

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία
Εκμετάλλευση της Κυματικής Ενέργειας
Με τη Μέθοδο
Της Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης



Φοιτητής
Παντζόπουλος Ν. Δημήτριος
Επιβλέπων Καθηγητής
Σταμάτης Αναστάσιος

Βόλος 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.:	11173/1
Ημερ. Εισ.:	22-01-2013
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξινόητικός Κωδικός:	ΠΤ – ΜΜ
	2012
	ΠΑΝ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική σχολή
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

Θέμα :

Εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας με τη μέθοδο της
παλλόμενης υδάτινης στήλης

Φοιτητής :

Παντζόπουλος Ν. Δημήτριος

A.M. : 994

e – mail : ritzyuna@hotmail.com

Επιβλέπων Καθηγητής :

Σταμάτης Αναστάσιος

Επιτροπή Εξέτασης :

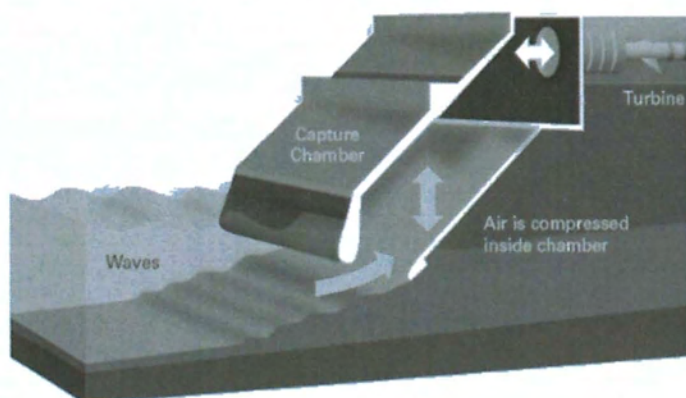
Ανδρίτσος Νικόλαος - Βαλουγεώργης Δημήτριος

Βόλος 2012

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τμήμα
Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

Εκμετάλλευση της Κυματικής Ενέργειας
Με τη Μέθοδο
Της Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης



Φοιτητής
Παντζόπουλος Ν. Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής
Σταμάτης Αναστάσιος

Βόλος 2012

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	3
1. Γενικά Στοιχεία.....	5
1.1. Ορισμός της Κυματικής Ενέργειας.....	5
1.2. Ιστορική αναδρομή και Εξέλιξη	5
1.3. Θεωρία της κυματικής ενέργειας.....	7
2. Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης της Κυματικής Ενέργειας	10
2.1. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών ανάλογα με τη βασική αρχή λειτουργίας τους... 10	
2.1.1. Τεχνολογία Αρθρώσεων / Εξασθενητή κυματισμών.....	10
2.1.2. Τεχνολογία Κατακόρυφης Ταλάντωσης / Αξονοσυμμετρικός - Σημειακός Απορροφητής	11
2.1.3. Τεχνολογία Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)	12
2.1.4. Τεχνολογία Υπερακόντισης / Υπέρβασης	12
2.1.5. Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (OWSC).....	13
2.1.6. Τεχνολογία βυθιζόμενης διαφορικής πίεσης.....	14
2.2. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών ανάλογα με τη θέση και το βάθος που σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν	14
2.2.1. Τεχνολογίες Ακτογραμμής – Χερσαία Ζώνη (βάθος νερού < 15m).....	14
2.2.2. Παράκτια Ζώνη (βάθος νερού < 25m)	15
2.2.3. Υπεράκτια Ζώνη (βάθος νερού > 25m)	15
3. Τεχνολογίες μετατροπών κυματικής ενέργειας χερσαίας ζώνης.....	16
3.1. Τεχνολογία Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)	16
3.1.1. LIMPET	16
3.1.2. WECA	29
3.2. Τεχνολογίες Υπέρβασης / Υπερύψωσης.....	31
3.2.1. SSG	31
3.3. Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης	38
3.3.1. LabBuoy.....	38
3.3.2. SDE	44
4. Τεχνολογίες Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας Παράκτιας Ζώνης	46
4.1. Τεχνολογίες Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.).....	46

4.1.1.	Mighty Whale	46
4.2.	Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης	48
4.2.1.	Lilypad Twin Membrane	48
4.2.2.	Combined Energy System (CES)	49
4.2.3.	WET EnGen	52
4.3.	Τεχνολογίες Αρθρώσεων	54
4.3.1.	WEM.....	54
4.4.	Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης.....	56
4.4.1.	Oyster.....	56
4.4.2.	SurfPower.....	61
5.	Τεχνολογίες Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας Υπεράκτιας Ζώνης	65
5.1.	Τεχνολογίες Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.).....	65
5.1.1.	BlueWave	65
5.1.2.	Backward Bent Duct Buoy	68
5.1.3.	Sperboy.....	73
5.2.	Τεχνολογίες Υπέρβασης / Υπερύψωσης.....	76
5.2.1.	Wave Dragon	76
5.3.	Τεχνολογία Σημειακού Απορροφητή	83
5.3.1.	AWS (Archimedes Wave Swing)	83
5.3.2.	Wavestar.....	88
5.3.3.	AquaBuoy	91
5.4.	Τεχνολογία Αρθρώσεων	94
5.4.1.	Pelamis	94
6.	Υπολογισμοί στην παλλόμενη στήλη ύδατος (OWC)	98
6.1.	Υπολογισμός πίεσης και στάθμης νερού στη στήλη.....	101
6.2.	Υπολογισμός της ισχύος στον θάλαμο	103
6.3.	Υπολογισμός παροχής στον στρόβιλο.....	104
6.4.	Υπολογισμός ισχύος εξόδου στρόβιλου	105
6.5.	Διαγράμματα και σχολιασμός.....	106
6.6.	Υπολογισμός Πλήθους Πτερυγίων	116
7.	Διάγραμμα Ροής	118
8.	Βιβλιογραφία	125

Εισαγωγή

Κίνητρο και υπόβαθρο

Σε παγκόσμια κλίμακα υπάρχει πολύ μεγάλη δραστηριότητα για την έρευνα και την εφαρμογή τεχνολογιών, που έχουν σκοπό την άντληση ενέργειας από ανεξάντλητες - ανανεώσιμες και μη ρυπογόνες πηγές, όπως είναι ο ήλιος, ο άνεμος, η γεωθερμία τα κύματα της θάλασσας κλπ. Ιδιαίτερα την τελευταία 15-ετία υπάρχει μεγάλη δραστηριότητα για εφαρμογές που χρησιμοποιούν την ενέργεια των θαλασσίων κυμάτων. Η τελευταία αυτή τεχνολογική εφαρμογή μπορεί να έχει ιδιαίτερη σημασία για την χώρα μας η οποία περιβάλλεται πανταχόθεν από θάλασσα, και για το αντικείμενο αυτό έχει εκπονηθεί η παρούσα Διπλωματική Εργασία.

Βάση για την εκπόνηση της απετέλεσε το γνωστικό αντικείμενο και περιεχόμενο της Σχολής μας, επί πλέον δε αντλήθηκαν στοιχεία από εκτεταμένη υπάρχουσα βιβλιογραφία και επίσης από πηγές στο διαδίκτυο και από εταιρείες που ήδη δραστηριοποιούνται στο εν λόγω αντικείμενο.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο τέλος της παρούσας εργασίας, υπάρχει λεπτομερής αναφορά των πηγών, βιβλιογραφίας και διαδικτύου, που υπήρξαν ιδιαίτερα χρήσιμες για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Περιλαμβάνονται επίσης πλήθος ιστοσελίδες φορέων και εταιρειών οι οποίες δραστηριοποιούνται σε έρευνα και εφαρμογή διαφόρων συστημάτων που έχουν επινοηθεί για την άντληση και αξιοποίηση της ενέργειας των θαλασσίων κυμάτων

Οργάνωση διπλωματικής

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται τα εξής :

- ♦ Αναφέρονται διεξοδικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά και στοιχεία, τα φυσικά μεγέθη και οι παράμετροι και επίσης τα μαθηματικά μοντέλα που

χρησιμοποιούνται για την σχετική έρευνα άντλησης και αξιοποίησης ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα.

- Έχει εξετασθεί ιδιαίτερα η Μετατροπή Ενέργειας Θαλάσσιων Κυμάτων με την μέθοδο της Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Oscillating Water Column ή εν συντομία OWC) και έχει γίνει ένας αναλυτικός υπολογισμός για την εν λόγω εφαρμογή. Λόγω της πολυπλοκότητας και συνθετότητας των σχετικών φαινομένων και παραμέτρων, έγινε χρήση μαθηματικού μοντέλου και αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος με τη μέθοδο Runge – Kutta 4^{ης} τάξης και χρήση γλώσσας Fortran. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν παρουσιάζονται με μορφή διαγράμματος στο κεφάλαιο 6 και το διάγραμμα ροής του κώδικα παρατίθενται στο κεφάλαιο 7. Έχει γίνει επίσης επί πλέον μια εκτεταμένη και χρήσιμη αναφορά, σε πλήθος ενδιαφερόντων συστημάτων που έχουν μέχρι σήμερα επινοηθεί για την άντληση και αξιοποίηση ενέργειας από τα κύματα, με παρουσίαση εικόνων, σχεδίων και διαγραμμάτων για την ευχερή κατανόηση και κατατόπιση.

1. Γενικά Στοιχεία

1.1. Ορισμός της Κυματικής Ενέργειας

Κυματική ενέργεια είναι η ενέργεια η οποία προέρχεται από τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται κατά τον θαλάσσιο κυματισμό. Αυτή η διαφορά δυναμικού μπορεί να δημιουργηθεί από διάφορους τύπους θαλάσσιας ροής, όπως είναι οι παλίρροιες, τα ρεύματα και η οσμωτική πίεση (διαφορά αλατότητας μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού) κ.α.. Λόγω της φυσικής ανανέωσής της και τη μη ύπαρξης διαδικασιών εξόρυξης, άντλησης και καύσης για τη συλλογή της συγκαταλέγεται στις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ). Αποτελεί μια γιγαντιαία δεξαμενή ηλεκτρικής ενέργειας, της οποίας η πιθανή ετήσια παραγωγή παγκοσμίως θα μπορούσε να φθάσει τις 360 TWh [1]

1.2. Ιστορική αναδρομή και Εξέλιξη

Η συστηματική έρευνα πάνω στη κυματική ενέργεια ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, όταν η πετρελαϊκή κρίση έστρεψε το γενικότερο ενδιαφέρον προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εκείνη τη χρονική περίοδο, έγιναν διάφορες προτάσεις για διατάξεις σύλληψης της ενέργειας των κυμάτων, ωστόσο το ποσοστό επιτυχίας για εκτενή χρήση τους δεν ήταν μεγάλο. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη επαρκούς τεχνολογίας (εξελιγμένα υλικά, σωστός σχεδιασμός κ.λπ.) ώστε οι διάφορες συσκευές να μπορούν να αντισταθούν στη καταστρεπτική δύναμη των ωκεάνιων κυμάτων. Όταν παρήλθε η ενεργειακή κρίση, ως συνέπεια είχε τον παραγκωνισμό του ενδιαφέροντος για τη κυματική ενέργεια και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 πολλές από τις δοκιμές διεκόπησαν. Η διακοπή της έρευνας είχε ως αποτέλεσμα την αργή εξέλιξη των διαφόρων τεχνολογιών σε αυτόν τον κλάδο, με τοποθέτηση πρωτότυπων πειραματικών διατάξεων κατά τη δεκαετία του 1980.. Μετά το 2000 η έρευνα και ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας σημειώνει αξιοσημείωτη αναβάθμιση, λόγω της συνεχούς αναζήτησης για σημαντική αύξηση της παραγωγής από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας εκτιμάται ότι θα αυξηθεί ραγδαία μέσα στις επόμενες δεκαετίες σε ολόκληρο τον κόσμο, και με ιδιαίτερα υψηλό ρυθμό στις χώρες της Ασίας. Χαρακτηρίστηκε η βιομηχανική ανάπτυξη της Κίνας θα απαιτήσει μέχρι το 2050 την εγκατάσταση νέων ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών συνολικής ισχύος περίπου 700 GW. Συγκριτικά, η συνολική ισχύς των ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών στην Ευρωπαϊκή Ένωση είναι περίπου 600 GW. Για την προσπάθεια κάλυψης ενός ποσοστού από αυτή την συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για

ενέργεια έχει γίνει στροφή προς όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και κατ'επέκταση και στη κυματική ενέργεια. Το 2007, οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης κατανάλωσαν συνολικά 2.926 TWh ηλεκτρικού ρεύματος (Ευρωπαϊκή Ένωση για τη Θαλάσσια Ενέργεια) [European Ocean Energy Association – EU-OEA, 2010]. Η παραγωγή ενέργειας από τη θάλασσα έχει τη δυνατότητα να φτάσει τα 3,6 GW εγκατεστημένης ισχύος ως το 2020 και περίπου τα 188GW ως το 2050.

Η θάλασσα μάζα αποτελεί το 75% του πλανήτη μας οπότε πρακτικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι διαθέτουμε μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Στη θάλασσα καθημερινά προσπίπτουν τεράστιες ποσότητες ηλιακής και αιολικής ενέργειας οι οποίες μετατρέπονται σε κύματα. Επίσης λόγω της αλληλεπίδρασης της γης με τη σελήνη δημιουργούνται φαινόμενα όπως η παλίρροια, μέσω της οποίας κινούνται ασύλληπτες ποσότητες ύδατος. Η διαφορά μεταξύ των θερμών και ψυχρών υδάτων καθώς και η διαφορά της αλατότητας μεταξύ των θαλάσσιων στρωμάτων έχουν ως αποτέλεσμα τη κίνηση των υδάτων. Όλα τα παραπάνω φαινόμενα μετατρέπουν τις διάφορες μορφές ενέργειας σε κυματική η οποία αποθηκεύεται στη θάλασσα και σκοπός είναι η σύλληψή της. Το κοινό χαρακτηριστικό των θαλάσσιων μορφών ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα η οποία είναι και η υψηλότερη από όλες τις ΑΠΕ. [2]

Η χρήση τεχνολογιών για συλλογή αυτής της ενέργειας αφορά άμεσα τη χώρα μας μιας και περιβάλλεται από θάλασσα, ενώ παράλληλα το Αιγαίο Πέλαγος έχει το υψηλότερο θαλάσσιο δυναμικό σε όλη τη Μεσόγειο.



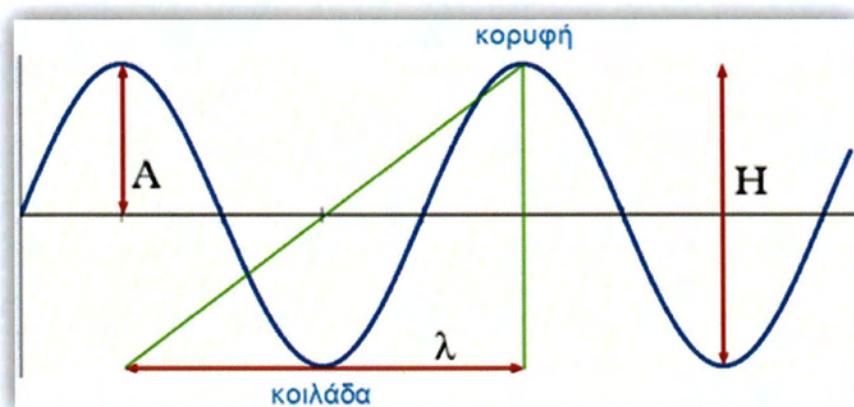
Εικόνα 1.0

1.3. Θεωρία της κυματικής ενέργειας

Κύμα ονομάζεται μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο. Ο όρος κύμα (από το αρχαίο ελληνικό ρήμα κύω = φουσκώνω) χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής συνήθως διαμέσου ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή γίνεται στα υλικά μέσα με παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του.

Τα θαλάσσια κύματα δημιουργούνται από τους ανέμους που πνέουν πάνω από το νερό και συναντώνται μόνο στα επιφανειακά ύδατα της θάλασσας. Κατά την έναρξη του ανέμου, στην επιφάνεια του ηρεμούντος ύδατος δημιουργούνται "ρυτίδες" ακανόνιστου σχήματος οι οποίες στη συνέχεια μετατρέπονται σε κύματα. Το μέγεθος των κυμάτων που δημιουργούνται εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου που πνέει πάνω από τη θάλασσα, τη διάρκειά του καθώς και την έκταση την οποία καλύπτει. Οι φυσικές παράμετροι που περιγράφουν τα κύματα είναι εξής :

1. Κορυφή κύματος : Το υψηλότερο σημείο του κύματος
2. Κοιλιάδα κύματος : Το χαμηλότερο σημείο του κύματος
3. Μήκος κύματος : Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων της ίδιας φάσης (είτε μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ή δύο διαδοχικών κοιλάδων) και συμβολίζεται με το γράμμα λ ή L .
4. Ύψος κύματος : Είναι η κάθετος απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και μιας κοιλάδας, είναι το αντίστοιχο πλάτος στη κυματική και συμβολίζεται με H .
5. Περίοδος κύματος : Είναι ο απαιτούμενος χρόνος για να διέλθουν από ένα (σταθερό) σημείο δύο διαδοχικά σημεία ιδίων φάσεων, (δύο κορυφές, ή δύο κοιλάδες), και συμβολίζεται συνήθως με το γράμμα T .
6. Συχνότητα κύματος: Ονομάζεται ο αριθμός των μηκών κύματος που διέρχονται από ένα (σταθερό) σημείο, στη μονάδα του χρόνου. Συμβολίζεται με N . [3]



Εικόνα 1.1 : χαρακτηριστικά ημιτονοειδούς κύματος

Η κυματική ενέργεια είναι πυκνότερη σε περιοχές όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι. Για τον λόγο αυτό, οι καλύτεροι κυματικοί πόροι στην Ευρώπη εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών ακτών της, δηλαδή στον Ατλαντικό Ωκεανό. Όσο τα κύματα πλησιάζουν στην ακτή, η ενέργεια που περιέχεται σε αυτά μετατρέπεται σε θερμική, λόγω της τριβής η οποία αναπτύσσεται κατά τη σύγκρουση των κυμάτων με τον πυθμένα της θάλασσας. Συνεπώς στα μεγαλύτερα βάθη το ενεργειακό περιεχόμενο των κυμάτων σαφώς είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτών της ακτής.

Η ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων η οποία μετράται σε Kw/m^2 είναι δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή της αιολικής ενέργειας και εκατό φορές μεγαλύτερη από αυτή της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν το βάθος των υδάτων είναι μεγαλύτερο από το μισό του μήκους κύματος, ο ρυθμός μεταφοράς της ενέργειας στην επιφάνεια των κυμάτων (Kw/m) δίνεται από τον τύπο:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m0}^2 T \approx \left(0.5 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} \right) H_{m0}^2 T$$

Όπου :

1. ρ : Η πυκνότητα του νερού [Kg/m^3]
2. g : Η επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2]
3. H_{m0} : Το αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος, το οποίο ορίζεται ως το 1/3 του μέσου ύψους κύματος [m]
4. T : Η περίοδος [sec]

Η συνολική ενέργεια η οποία περιέχεται στα κύματα προέρχεται από τον συνδυασμό δυο τύπων ενέργειας. Της κινητικής και της δυναμικής, που προκύπτουν από τις κινήσεις όπως αυτές φαίνονται στην εικόνα 1.2 και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο :

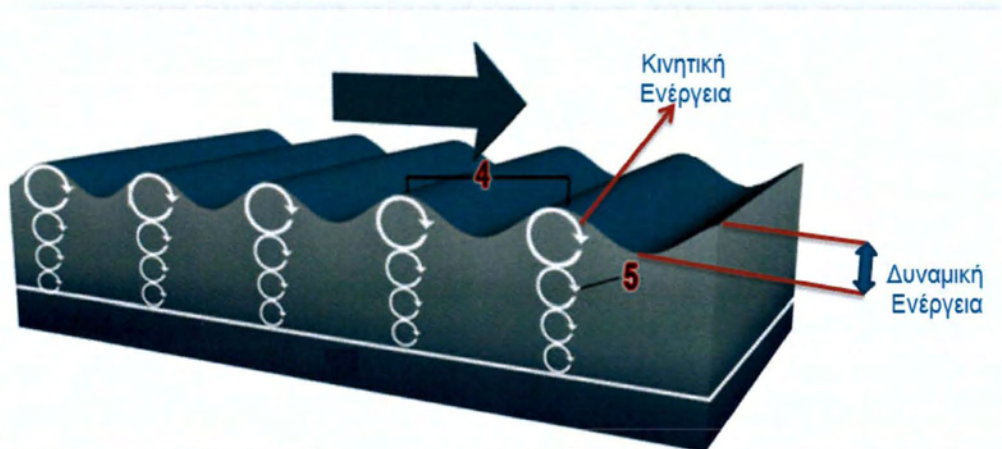
$$E_{ολ} = E_{κιν.} + E_{δυν.} \rightarrow E_{ολ.} = \frac{\rho * g * h^2 * L * B}{16} + \frac{\rho * g * h^2 * L * B}{16} \rightarrow$$

$$E_{ολ} = \frac{\rho * g * h^2 * L * B}{8}$$

Όπου :

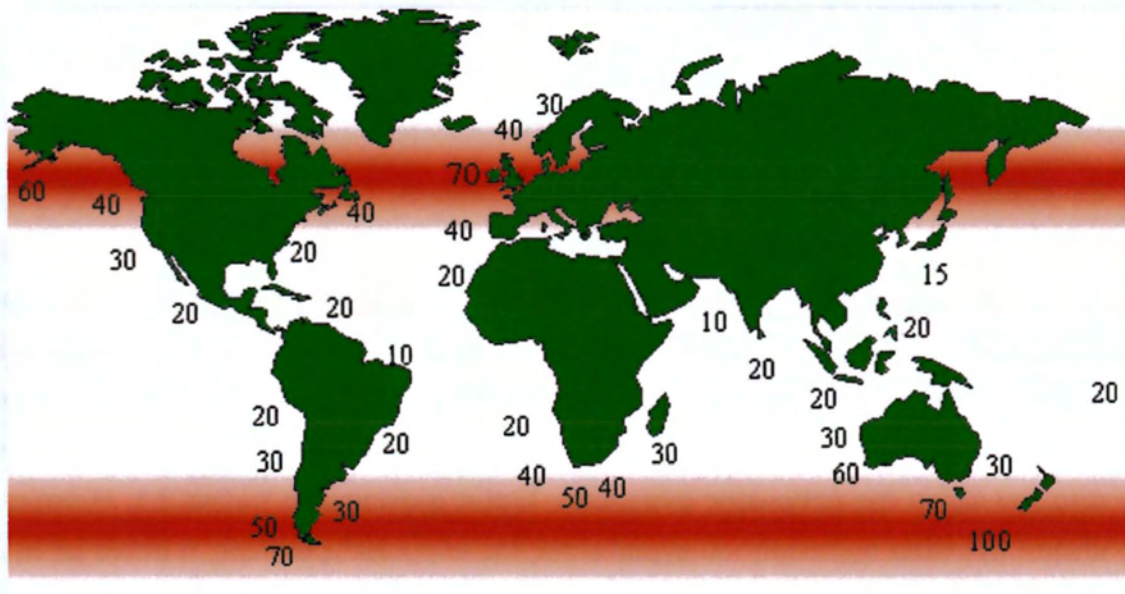
1. ρ : η πυκνότητα του νερού
2. g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
3. H : ύψος κύματος

- a) L : βήμα κύματος
- b) B : μετωπικό μήκος κύματος



Εικόνα 1.2 : κίνηση και αντίστοιχη παραγόμενη ενέργεια

Κατά τον υπολογισμό του επιπέδου της κυματικής ενέργειας μιας ορισμένης περιοχής, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την ετήσια μέση τιμή όλων των καταστάσεων της θάλασσας. Ο παράγοντας αυτός είναι σημαντικός γιατί οι εποχιακές μεταβολές μπορεί να είναι μεγάλες και να προκαλέσουν σημαντικές αποκλίσεις στους υπολογισμούς. Παρακάτω φαίνεται ο παγκόσμιος χάρτης κατανομής της ενέργειας των κυμάτων ανά περιοχή. [4]



Εικόνα 1.3 : παγκόσμιος χάρτης κατανομής κυματικής ενέργειας [5]

Παρατηρούμε ότι στις νότιες ακτές της Χιλής οι ενεργειακοί πόροι από τα κύματα, είναι της τάξης του 30-70 Kw/m. Στην Αυστραλία, όπου φαίνεται να υπάρχει το μεγαλύτερο δυναμικό παγκοσμίως, κυμαίνεται από 70-100Kw/m πλάτους διερχομένου κύματος, ενώ στην Ευρώπη στα παράλια της Αγγλίας οι πόροι μπορούν να φτάσουν και τα 76Kw/m. Η χώρα μας έχει το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό στη Μεσόγειο, το οποίο μπορεί να ξεπεράσει και τα 15Kw/m σε ορισμένες περιοχές.

2. Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης της Κυματικής Ενέργειας

Οι φορείς οι οποίοι ασχολούνται με την ανάπτυξη των διαφόρων τεχνολογιών της κυματικής ενέργειας, ακολουθούν δυο μεθόδους για την κατηγοριοποίηση των συσκευών τις οποίες κατασκευάζουν. Η κατηγοριοποίηση γίνεται σύμφωνα :

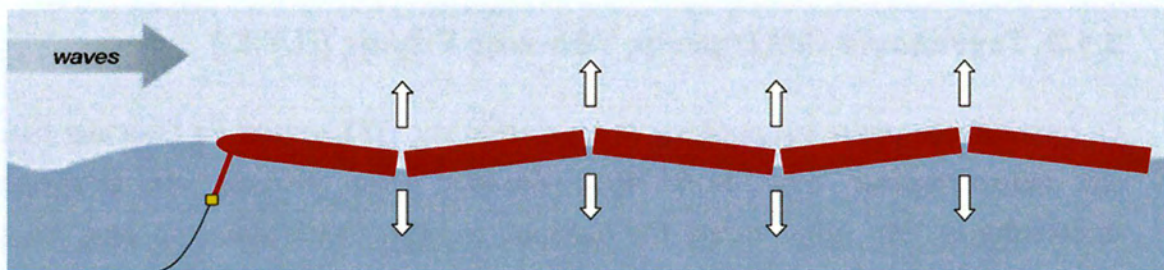
1. Με τη μέθοδο την οποία χρησιμοποιείται από τη συσκευή για την απόσπαση της ενέργειας
2. Με τη θέση και το βάθος στο οποίο κατασκευάζονται για να λειτουργούν

Παρακάτω θα δούμε αναλυτικότερα τις δυο αυτές μεθόδους.

2.1. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών ανάλογα με τη βασική αρχή λειτουργίας τους

2.1.1. Τεχνολογία Αρθρώσεων / Εξασθενητή κυματισμών

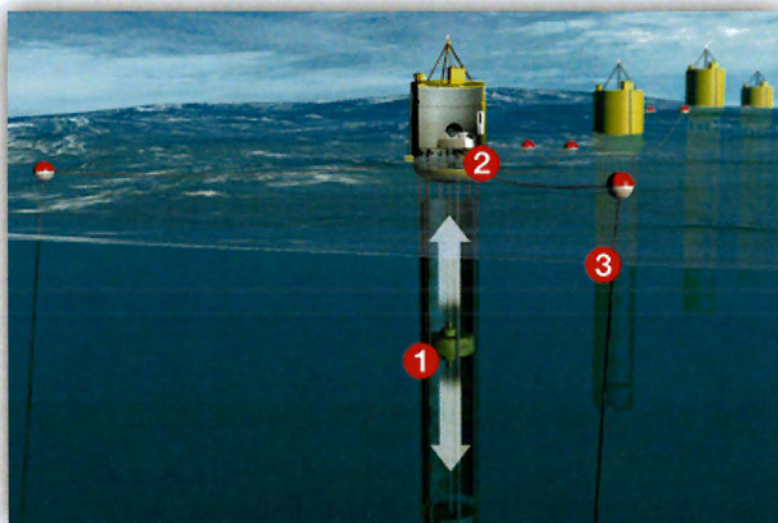
Οι εξασθενητές κυματισμών είναι συνήθως πλωτές μακρόστενες συσκευές μεγάλου μήκους, οι οποίες αποτελούνται από τμήματα τα οποία ενώνονται μεταξύ τους αρθρωτά. Εντός των αρθρώσεων είναι τοποθετημένες υδραυλικές αντλίες. Οι εξασθενητές, τοποθετούνται κάθετα στη ροή των διερχόμενων θαλάσσιων κυμάτων. Κάθε φορά που πλησιάζει ένα διερχόμενο κύμα, τα διαδοχικά τμήματα της συσκευής εκμεταλλεύονται τις διαφορετικές φάσεις του κύματος με αποτέλεσμα πρακτικά να “περιστρέφονται” γύρω από τον άξονα της άρθρωσης αντίρροπα. Όπως φαίνεται στη εικόνα 2.1. Η παραπάνω κίνηση προκαλεί συμπίεση του υγρού εντός της υδραυλικής αντλίας, η οποία με τη σειρά της δίνει κίνηση σε υδραυλικούς κινητήρες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας αρθρώσεων είναι η συσκευή Pelamis και η σχεδία Cockerel. [8]



εικόνα 2.1 : κινήσεις τμημάτων εξασθενητή κυματισμών [7]

2.1.2. Τεχνολογία Κατακόρυφης Ταλάντωσης / Αξονοσυμμετρικός - Σημειακός Απορροφητής

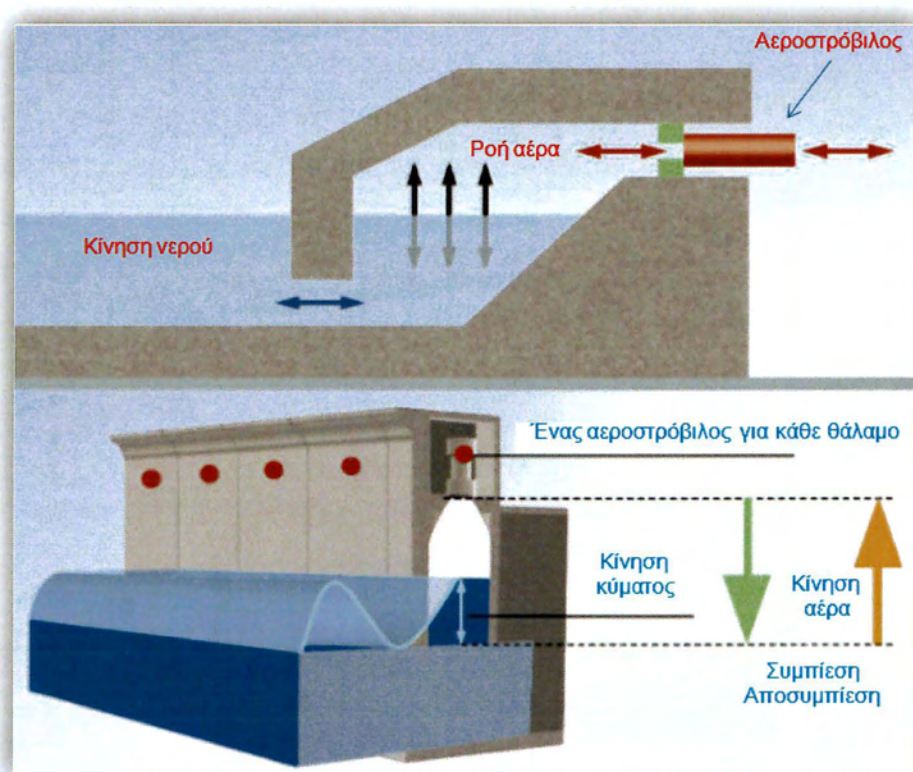
Οι κατασκευές αυτού του τύπου τοποθετούνται στην επιφάνεια της θάλασσας και είναι πλωτές. Έχουν μικρές διαστάσεις σε σχέση με το τυπικό μήκος κύματος και διάμετρο συνήθως της τάξης μερικών μέτρων. Καθώς διέρχονται τα κύματα, οι πλωτήρες συνήθως εκτελούν μια κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση. Αυτή η κίνηση μετατρέπεται μέσω μηχανικών και υδραυλικών συστημάτων σε περιστροφική κίνηση ή άλλου είδους κίνηση για τη λειτουργία κάποιας ηλεκτρογεννήτριας. Το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφησης σημαίνει βασικά την ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Σημερινά παραδείγματα στην κατηγορία αυτή είναι οι συσκευές Wavebob, OPT PowerBuoy και Aquabuoys. Ωστόσο, παράδειγμα μη αξονοσυμμετρικού σημειακού απορροφητή, με σχεδόν παρόμοια χαρακτηριστικά, είναι και η SeaREV. [8]



Εικόνα 2.2 : Σημειακός Απορροφητής – Κίνηση

2.1.3. Τεχνολογία Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)

Οι συσκευές οι οποίες εφαρμόζουν τη τεχνολογία της ΠΥΣ μπορεί να είναι είτε πλωτές είτε εγκατεστημένες στην ακτή. Ένας θάλαμος είναι ανοιχτός και εκτεθειμένος υποθαλάσσια. Ένα τμήμα αυτού του θαλάμου περιέχει θαλασσινό νερό μιας και είναι ανοιχτός προς τη θάλασσα και εγκλωβισμένο αέρα πάνω από το νερό. Μ' αυτό τον τρόπο σχηματίζεται μια υδάτινη στήλη εντός του θαλάμου. Καθώς τα κύματα πλησιάζουν την κατασκευή υψώνουν τη στήλη νερού που βρίσκεται στο υποθαλάσσιο τμήμα και αυτή με τη σειρά της συμπιέζει τον αέρα ο οποίος βρίσκεται πάνω από αυτή. Στη συνέχεια ο αέρας διέρχεται δια μέσου ενός αεροστροβίλου και μέσω της περιστροφικής κίνησής του παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Κατασκευές αυτού του τύπου είναι η πλωτή OWC, το Sperboy MRC κ.α. [8]

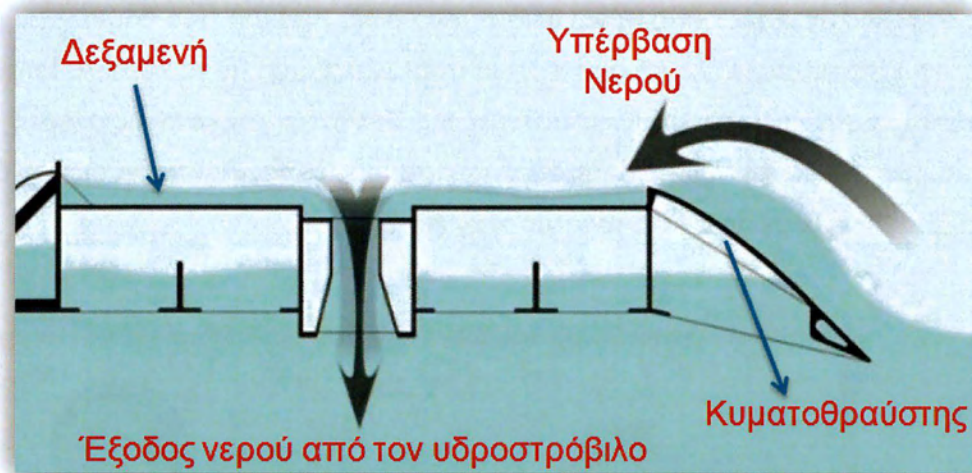


Εικόνα 2.3 : Τεχνολογία ΠΥΣ [9]

2.1.4. Τεχνολογία Υπερακόντισης / Υπέρβασης

Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι είτε πλωτές είτε τοποθετημένες στην ακτή. Αποτελούνται από έναν κυματοθραύστη στον οποίο προσκρούουν τα κύματα και στη συνέχεια περισυλλέγονται σε μια δεξαμενή η οποία βρίσκεται συνήθως σε μεγαλύτερο ύψος από τη στάθμη της θάλασσας. Έπειτα, το νερό το οποίο συλλέχθηκε διέρχεται από υδροστροβίλους που βρίσκονται στον πυθμένα της δεξαμενής. Ο υδροστροβίλος

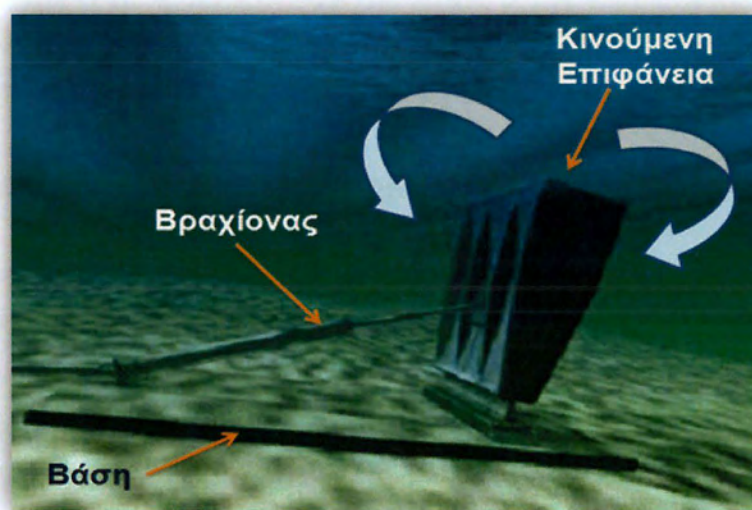
μετατρέπει την υψομετρική διαφορά σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό διέρχεται διαμέσου του. Αντιπροσωπευτικοί μετατροπείς κυματικής ενέργειας αυτής της κατηγορίας είναι το Wave Dragon και το SSG. [8]



Εικόνα 2.4 : Σύστημα Υπέρβασης

2.1.5. Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (OWSC)

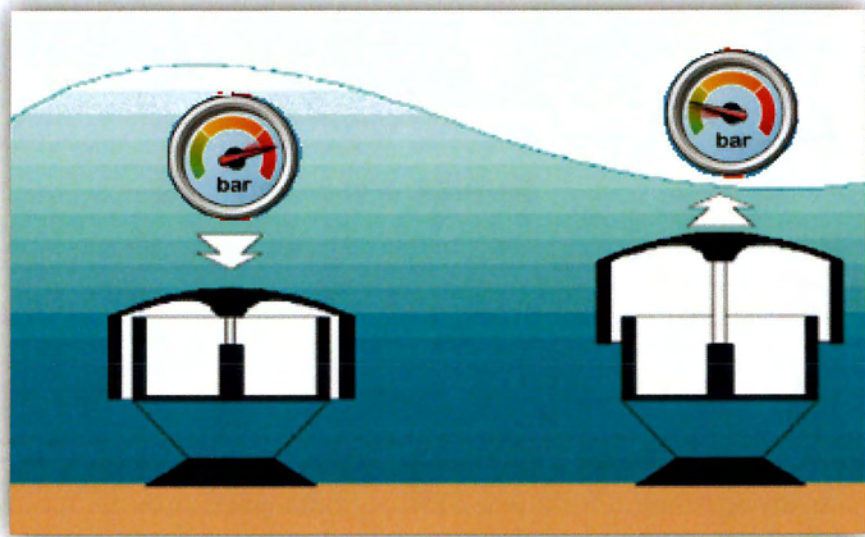
Οι συσκευές αυτές τοποθετούνται συνήθως υποθαλάσσια. Αποτελούνται από μια επιφάνεια η οποία είναι προσαρμοσμένη στη μια άκρη ενός βραχίονα. Στην άλλη άκρη του, ο βραχίονας στηρίζεται σε μια βάση τοποθετημένη στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η διάταξη επιτρέπει τη παλινδρομική κίνηση του βραχίονα σαν ανεστραμμένο εκκρεμές λόγω της οριζόντιας κίνησης των σωματιδίων νερού των κυμάτων. Η κίνηση αυτή παράγει ηλεκτρική ενέργεια. [8]



Εικόνα 2.5 : Συσκευή OWSC της Waveroller

2.1.6. Τεχνολογία βυθιζόμενης διαφορικής πίεσης

Οι συσκευές τοποθετούνται συνήθως υποθαλάσσια κοντά στην ακτή και προσαρτώνται στον πυθμένα της θάλασσας. Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, πράγμα που δημιουργεί μια διαφορά πίεσης η οποία αναγκάζει τη συσκευή να ανεβοκατεβαίνει με τα κύματα. Όταν σχεδιαστεί σωστά για την συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας, η κατηγορία αυτή διαθέτει και αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης. Αντιπροσωπευτική εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας είναι ο μετατροπέας AWS. [8]



Εικόνα 2.6 : κίνηση συσκευής τεχνολογίας βυθιζόμενης διαφορικής πίεσης [16]

2.2. Κατηγοριοποίηση τεχνολογιών ανάλογα με τη θέση και το βάθος που σχεδιάστηκαν για να λειτουργούν

2.2.1. Τεχνολογίες Ακτογραμμής – Χερσαία Ζώνη (βάθος νερού < 15m)

Τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν αυτή τη τεχνολογία εγκαθίστανται στο έδαφος ή σε κάποια υπάρχουσα τεχνητή δομή όπως οι κυματοθραύστες στην ακτογραμμή. Το βάθος του νερού κυμαίνεται περίπου στα 15 m. Οι τεχνολογίες ακτογραμμής δεν απαιτούν αγκυροβολήση σε μεγάλα βάθη, κάτι το οποίο συνεπάγεται διευκόλυνση στη συντήρησή τους. Επίσης, έχουν τη δυνατότητα αξιοποίησης των χαρακτηριστικών της περιοχής για υποβοήθηση της συλλογής της ενέργειας. Είναι λοιπόν ζωτικής σημασίας η επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας εγκατάστασης της κατασκευής, διότι μια

λανθασμένη περιοχή μπορεί να προκαλέσει ακριβώς τα αντίθετα αποτελέσματα. Εκτός από την απαίτηση για επιλογή της σωστής περιοχής εγκατάστασης, δυο ακόμη περιορισμοί των τεχνολογιών ακτογραμμής, είναι το εύρος της παλίρροιας και το χαμηλότερο ενεργειακό δυναμικό το οποίο έχουν διαθέσιμο προς εκμετάλλευση. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη μείωση του βάθους μειώνεται ταυτόχρονα το ενεργειακό περιεχόμενο των κυμάτων. Αντιπροσωπευτική κατασκευή ακτογραμμής είναι το Sperboy το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία παλλόμενης υδάτινης στήλης (ΠΥΣ) . [10]

2.2.2. Παράκτια Ζώνη (βάθος νερού < 25m)

Οι κατασκευές αυτές εδράζονται συνήθως στον πυθμένα της θάλασσας και είναι ειδικά σχεδιασμένες ώστε να λειτουργούν αυτόνομα. Λόγω του μικρού βάθους νερού (μέχρι 25m) η ονομαστική ισχύς τους περιορίζεται περίπου στα 500Kw–1Mw. Έχουν σχεδόν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις τεχνολογίες ακτογραμμής, ενώ παράλληλα υπόκειντο σε κύματα υψηλότερου επιπέδου ισχύος. Αντιπροσωπευτική κατασκευή αυτής της κατηγορίας είναι το Oyster, το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία OWSC που αναφέραμε νωρίτερα. [10]

2.2.3. Υπεράκτια Ζώνη (βάθος νερού > 25m)

Σε αυτή τη ζώνη λόγω του μεγάλου βάθους χρησιμοποιούνται πλωτές κατασκευές οι οποίες είναι ικανές να εκμεταλλεύονται το μεγαλύτερο κυματικό δυναμικό αυτών των θαλάσσιων περιοχών. Οι συσκευές αγκυροβολούνται στον πυθμένα της θάλασσας. Αν και τα συστήματα που προορίζονται για αυτή τη ζώνη ποικίλλουν, μπορεί να γίνει μια γενικότερη κατηγοριοποίηση η οποία φαίνεται παρακάτω :

- a) Μετατροπείς ενέργειας μικρού βάθους (25 – 70 m)
- b) Μετατροπείς ενέργειας μεγάλου βάθους (>75 m)

Αντιπροσωπευτική κατασκευή η οποία τοποθετείται στην υπεράκτια ζώνη είναι το pelamis, το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία εξασθενητή κυμάτων. [10]

Παρακάτω θα αναφερθούμε σε κατασκευές οι οποίες χρησιμοποιούν κάποια από τις παραπάνω τεχνολογίες ή συνδυασμό αυτών. Θα εμβαθύνουμε στο τεχνικό μέρος και σε περαιτέρω χρήσιμα στοιχεία που τις αφορούν. Η ταξινόμηση την οποία θα

χρησιμοποιήσουμε για να αναφερθούν σε συγκεκριμένες κατασκευές θα είναι αρχικά ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης τους (Χερσαία, Παράκτια και Υπεράκτια ζώνη) και για κάθε ζώνη θα αναφέρουμε τις κατασκευές ανάλογα με την αρχή λειτουργίας τους.

3. Τεχνολογίες μετατροπών κυματικής ενέργειας χερσαίας ζώνης

3.1. Τεχνολογία Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)

Από την έναρξη του προγράμματος UK Wave Energy το 1974 ο συνδυασμός της παλλόμενης υδάτινης στήλης (ΠΥΣ) με έναν στρόβιλο Wells έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μια αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική λύση για την μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε αξιοποιήσιμη ισχύ. Τα πτερύγια του στρόβιλου Wells είναι κατασκευασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε η φορά περιστροφής του να παραμένει ίδια σε έναν κύκλο ισχύος.

Η συγκεκριμένη τεχνολογία έχει μεγάλη εμπορική απήχηση και γι' αυτό έχουν κατασκευαστεί αρκετές μονάδες παγκοσμίως (Νορβηγία, Κίνα, Ιαπωνία, Ινδία, Πορτογαλία, Ηνωμένο Βασίλειο). Επίσης μονάδες Π.Υ.Σ. με κυματοθραύστες είναι υπό κατασκευή στο Μουτρίκο στη Βόρεια Ισπανία και στο Πόρτο στη Πορτογαλία. Τα συστήματα Π.Υ.Σ. δεν χρησιμοποιούν μόνο στρόβιλους Wells για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Κάποιοι κατασκευαστές επικεντρώνονται στη χρήση ωστικών στρόβιλων (impulse turbines) καθώς και στη χρήση συστημάτων βαλβίδων σε συνδυασμό με στρόβιλους μονής κατεύθυνσης. Επί του παρόντος, παρόλη την ευρεία ύπαρξη τεχνολογικών καινοτομιών, οι χρήσεις στρόβιλων Wells σε συστήματα Π.Υ.Σ. είναι περισσότερο προσιτή λόγω της απλότητας και της ευελιξίας την οποία παρουσιάζουν.

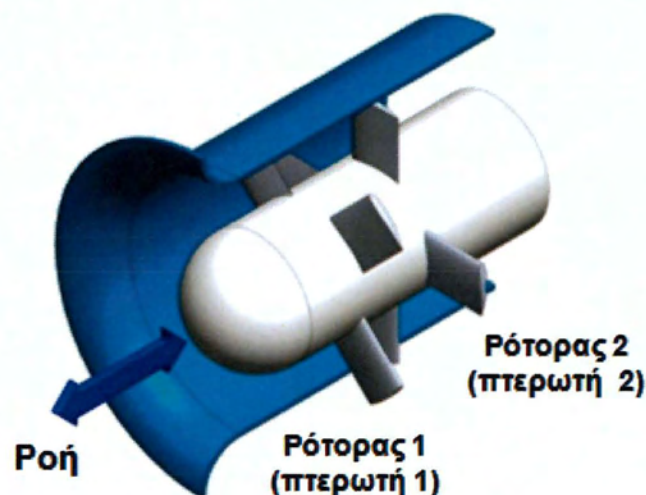
3.1.1.LIMPET

Το 1998 το Queen's University Belfast σε συνεργασία με τις εταιρίες Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και την I.S.T. Portugal ξεκίνησαν τη κατασκευή ενός συστήματος Π.Υ.Σ. χερσαίας ζώνης. Αυτή η κατασκευή είναι γνωστή ως LIMPET (Land Installed Marine Power Energy Transmitter). Η εγκατάστασή της έγινε στη νήσο Islay στα δυτικά παράλια της Σκωτίας και ξεκίνησε να λειτουργεί τον Νοέμβριο του 2000. Η εγκατάσταση από τότε ελέγχεται εξ αποστάσεως και τροφοδοτεί με ηλεκτρική ενέργεια το Ηνωμένο Βασίλειο. [11]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

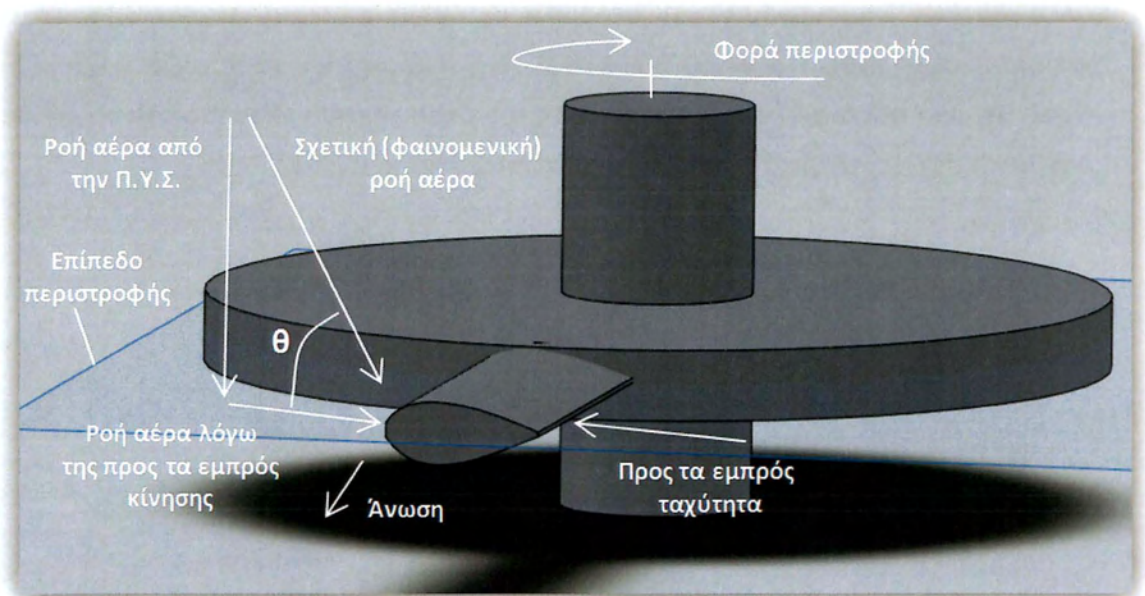
Η συσκευή περιλαμβάνει τρεις στήλες ύδατος οι οποίες ταλαντώνονται εντός θαλάμων, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από μπετόν και έχουν εσωτερικές διαστάσεις 6m επί 6m και βρίσκονται σε κλίση 40°. Οι θάλαμοι επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ανοίγματος το οποίο βρίσκεται στο επάνω μέρος τους. Οι θάλαμοι έχουν εξωτερικό πλάτος 21m και είναι τοποθετημένοι 17m εντός της ακτογραμμής. Η κατακόρυφη ταλάντωση της στήλης ύδατος προσομοιάζει την κίνηση ενός εμβόλου και συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται πάνω από αυτή. Με τη σειρά του ο αέρας εισέρχεται μέσα από έναν στρόβιλο Wells και μέσω αυτού παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Η διάταξη του στρόβιλου Wells είναι η εξής. Επτά πτερύγια από ανοξείδωτο χάλυβα είναι τοποθετημένα συμμετρικά σε κυκλική διάταξη με εξωτερική διάμετρο 2.6m. Τα πτερύγια είναι προσαρμοσμένα μέσω ενός δακτυλίου, ο οποίος παραλαμβάνει τα φορτία των φυγόκεντρων δυνάμεων, σε μια πλάκα η οποία με τη σειρά της προσαρμόζεται κατευθείαν στον άξονα μιας επαγωγικής γεννήτριας 250kW. Η παραπάνω διάταξη χρησιμοποιείται εις διπλούν. Τα δύο τμήματα τοποθετούνται αντίθετα το ένα πίσω από το άλλο και έτσι δημιουργούν έναν στρόβιλο με διπλή πτερωτή (εικόνα 3.1). Το βασικό χαρακτηριστικό ενός στρόβιλου Wells είναι ότι η πτερωτή του περιστρέφεται συνεχώς ως προς την ίδια φορά ανεξαρτήτως της ροής του αέρα. Αυτή η ιδιαιτερότητα του στρόβιλου οφείλεται στα συμμετρικά κατασκευασμένα πτερύγιά του. [12]



Εικόνα 3.1 : Διάταξη στρόβιλου Wells διπλής πτερωτής (contra rotating) [13]

Την αρχή λειτουργίας του στροβίλου Wells θα περιγράψουμε αναλυτικότερα παρακάτω με τη βοήθεια της εικόνας 3.2. Το επίπεδο περιστροφής της πτερωτής είναι κάθετο στο επίπεδο ροής του αέρα εντός του αγωγού του στροβίλου. Η προς τα εμπρός κίνηση των πτερυγίων σε συνδυασμό με την κάθετη ροή του αέρα, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φαινομενικού ρεύματος αέρα που προσκρούει στα πτερύγια και βρίσκεται υπό γωνία “ θ ” (γωνία πρόσκρουσης) σε σχέση με το επίπεδο περιστροφής τους. Η γωνία πρόσκρουσης “ θ ” μεταβάλλεται από 0° όταν ο στρόβιλος περιστρέφεται, αλλά δεν υπάρχει ροή αέρα στον αγωγό του, μέχρι 90° όταν υπάρχει ροή αέρα στον αγωγό, αλλά ο στρόβιλος δεν περιστρέφεται. Στην επιφάνεια όλων των πτερυγίων δημιουργείται άνωση μέχρι γωνία πρόσκρουσης 90° όπως αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.2. Αυτή η δύναμη άνωσης παρατηρούμε ότι έχει μια συνιστώσα με διεύθυνσή ίδια με τη διεύθυνση περιστροφής του στροβίλου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα ενός στροβίλου Wells, όπως αναφέραμε και νωρίτερα, είναι ότι ανεξαρτήτως της διεύθυνσης ροής του αέρα εντός του στροβίλου, η φορά περιστροφής του παραμένει πάντοτε η ίδια. Γι’ αυτό τον λόγο το σύστημα χαρακτηρίζεται ως αυτορουθιζόμενο. [11]



Εικόνα 3.2 : Αρχή λειτουργίας στροβίλου Wells [14]

Στη πράξη, στα πτερύγια του στροβίλου ασκούνται δυνάμεις οπισθέλκουσας και άνωσης. Επειδή η επιφάνεια των πτερυγίων είναι μεγάλη, οι δυνάμεις οπισθέλκουσας είναι περισσότερο αισθητές συγκριτικά με εκείνες της άνωσης. Αυτό σημαίνει ότι για μικρές γωνίες πρόσκρουσης (μικρότερες από 2°) η συνιστώσα της άνωσης στη διεύθυνση περιστροφής δεν μπορεί να υπερνικήσει τις οπισθέλκουσας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην περιστρέφεται ο στρόβιλος. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείτε και για μεγάλες γωνίες

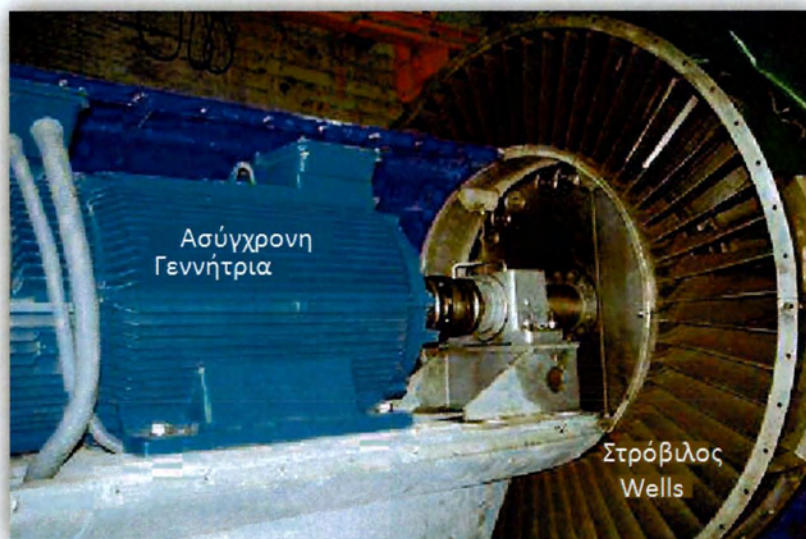
πρόσκρουσης (μεγαλύτερες από 14°) όπου τα πτερύγια συναντούν μεγάλη αντίσταση και έτσι είναι ανέφικτη η κίνηση του στροβίλου. Ο στρόβιλος περιστρέφεται ιδανικά για γωνία πρόσκρουσης περίπου 7°.

Για τη περιγραφή της ροής του αέρα στον στρόβιλο, αντί να χρησιμοποιήσουμε την γωνία πρόσκρουσης "θ" εισάγουμε μια νέα αδιάστατη μεταβλητή την οποία ονομάζουμε συντελεστή ροής "Φ". Ο συντελεστής ροής "Φ" ορίζεται ως η εφαπτομένη της γωνίας πρόσκρουσης "θ".

$$\Phi = \tan(\theta) = \frac{V_x}{V_t} = \frac{V_x}{r\omega} \quad (3.1)$$

Όπου :

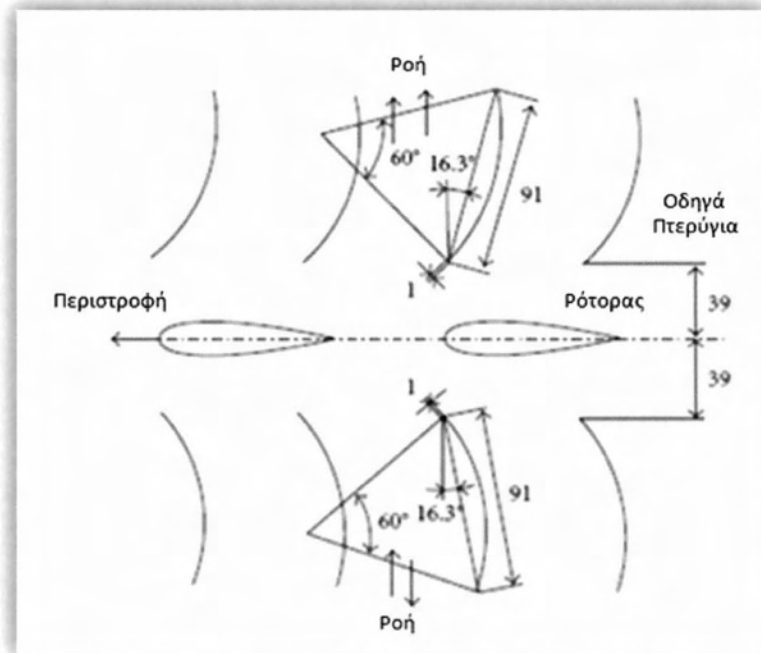
- V_x : η αξονική ταχύτητα ροής του αέρα
- V_t : ταχύτητα περιστροφής της άκρης του πτερυγίου
- r : η ακτίνα του πτερυγίου
- ω : η γωνιακή ταχύτητα



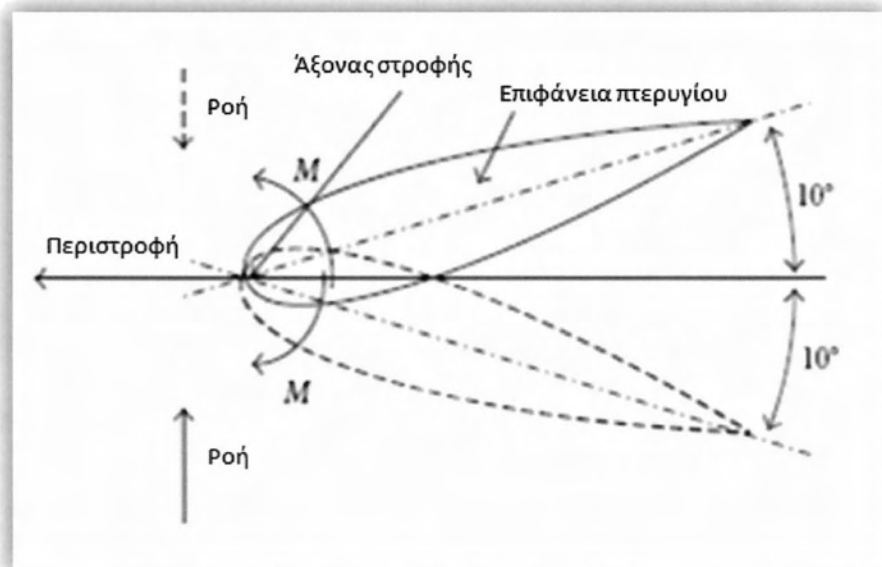
Εικόνα 3.3 : Ο στρόβιλος Wells προσαρμοσμένος στην ασύγχρονη γεννήτρια [15]

Η απόδοση ενός στροβίλου Wells αλλάζει ανάλογα με τη μορφή της επιφάνειας των πτερυγίων και το μέγεθος του. Αποδόσεις κορυφής της τάξεως του 90% είναι εφικτές.

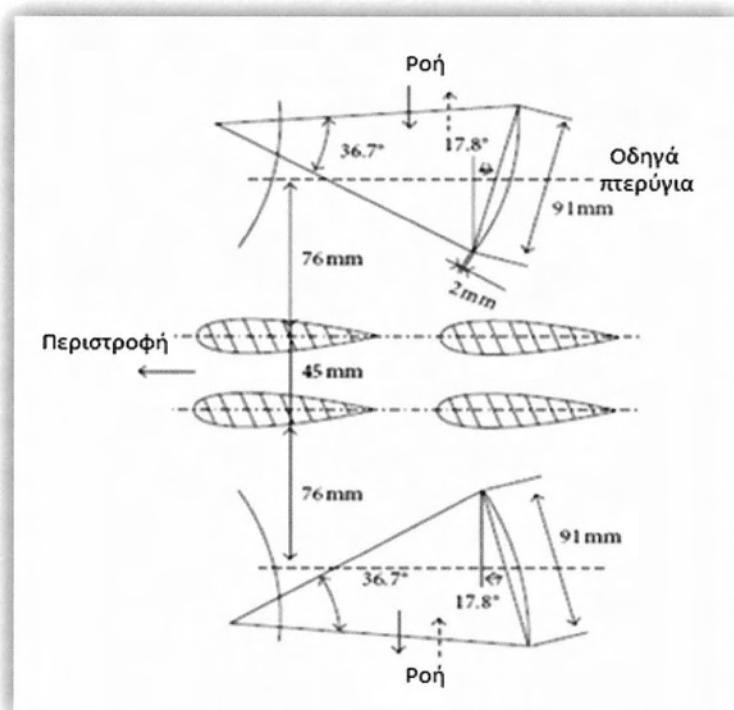
Η απλή διάταξη του στροβίλου Wells (μια σειρά συμμετρικών πτερυγίων) εν συνεχεία αναπτύχθηκε περαιτέρω με συμπληρωμένα και βελτιωμένα τεχνικά χαρακτηριστικά όπως φαίνεται, σχεδιαστικά, στα σχήματα που ακολουθούν :



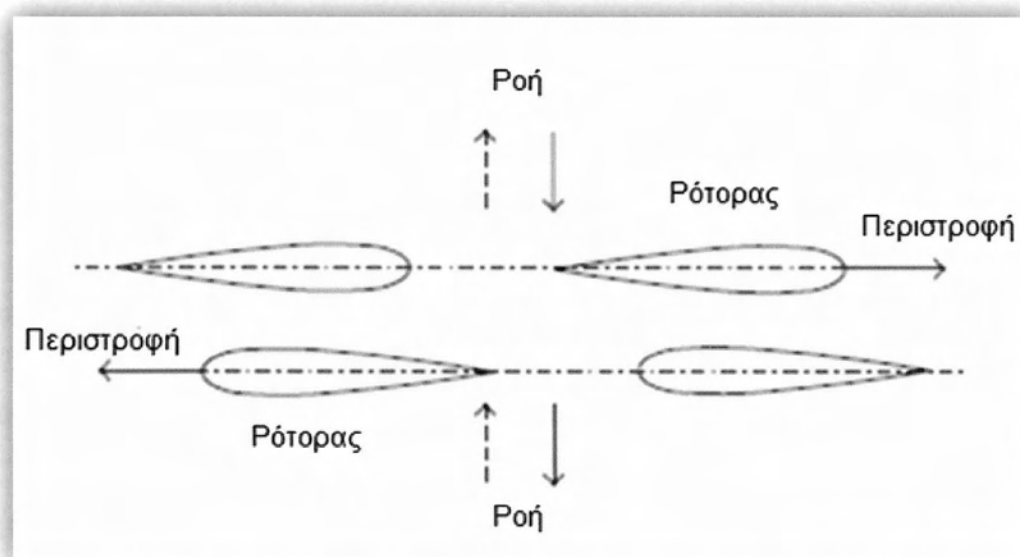
Εικόνα 3.4 : Στρόβιλος Wells με οδηγά πτερύγια



Εικόνα 3.5 : Στρόβιλος Wells με αυτορυθμιζόμενα πτερύγια



Εικόνα 3.6 : Στρόβιλος Wells με δύο ομόρροπα περιστρεφόμενες πτερωτές και με οδηγά πτερύγια



Εικόνα 3.7 : Στρόβιλος Wells με δύο αντίθετα περιστρεφόμενες πτερωτές

Εμείς θα μελετήσουμε την απόδοση ενός στροβίλου Wells όπως αυτή παρουσιάζεται στο ενδεικτικό διάγραμμα της εικόνας 3.8. Η μέγιστη απόδοση παρατηρούμε ότι φτάνει το 75,5%. Καθώς η στήλη ύδατος ταλαντώνεται, ανάλογα με την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων, η ροή του αέρα μέσω του στροβίλου μεταβάλλεται μιας και αλλάζουν οι ταχύτητες, και ως εκ τούτου ο συντελεστής ροής αυξομειώνεται. Το παραπάνω φαινόμενο επηρεάζει τη καμπύλη αποτελεσματικότητας και έχει ως συνέπεια ότι ολόκληρος ο κύκλος αποτελεσματικότητας θα βρίσκεται κάτω από την κορυφή, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.8.

Μια εκτίμηση της συνολικής μέσης απόδοσης ενός κύκλου ισχύος μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τη στιγμιαία διατιθέμενη υδραυλική ισχύ η οποία εισάγεται στον στρόβιλο κατά τη ροή του αέρα, καθώς και την ισχύ η οποία μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από τον στρόβιλο. Παρακάτω φαίνονται οι τύποι με τη βοήθεια των οποίων γίνεται ο υπολογισμός.

$$P = cQ^2 \quad (3.2)$$

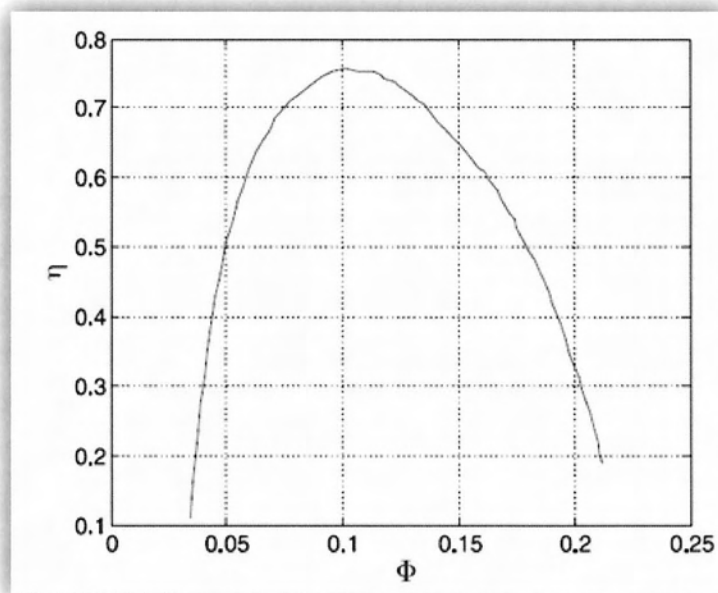
$$\eta_{av} = \frac{\sum cQ^2}{\sum c\eta(\varphi)Q^2} = \frac{\sum Q^2}{\sum \eta(\varphi)Q^2} \quad (3.3)$$

Όπου :

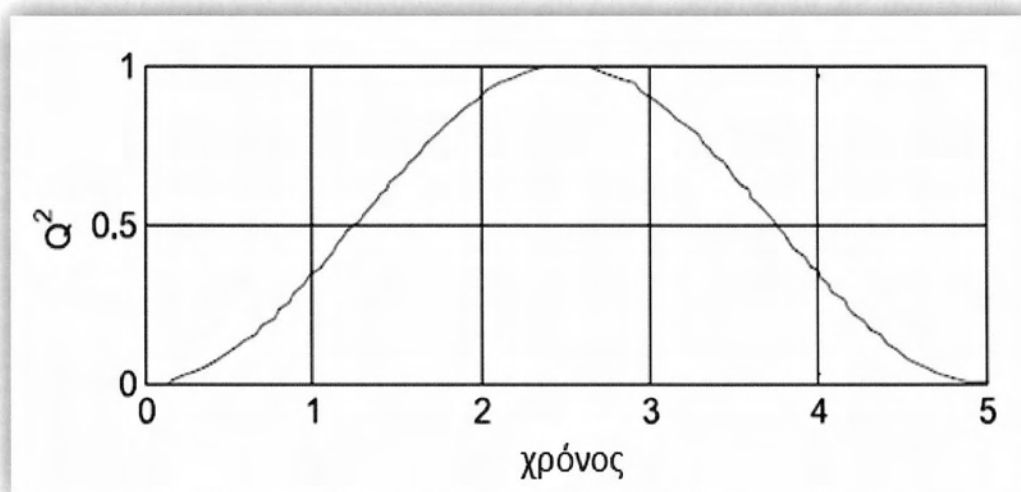
- P : Η στιγμιαία ισχύς που περιέχεται στον αέρα
- Q : Η στιγμιαία παροχή αέρα
- c : η πτώση πίεσης ανά μονάδα μάζας της ροής ή η ταλάντωση του στροβίλου
- $P_t = \eta(\varphi)cQ^2$: η στιγμιαία ισχύς η οποία μετατρέπεται από τον στρόβιλο.
- η_{av} : η μέση απόδοση του στροβίλου

Στη συνέχεια θεωρούμε ένα ημιτονοειδές προφίλ ροής αέρα το οποίο εισέρχεται στον στρόβιλο και μελετούμε τη περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου. Με βάση αυτή τη ροή είναι δυνατόν να κατασκευαστούν τα διαγράμματα της στιγμιαίας απόδοσης του στροβίλου και της παροχής του αέρα όπως αυτά φαίνονται στις εικόνες 3.9, 3.10

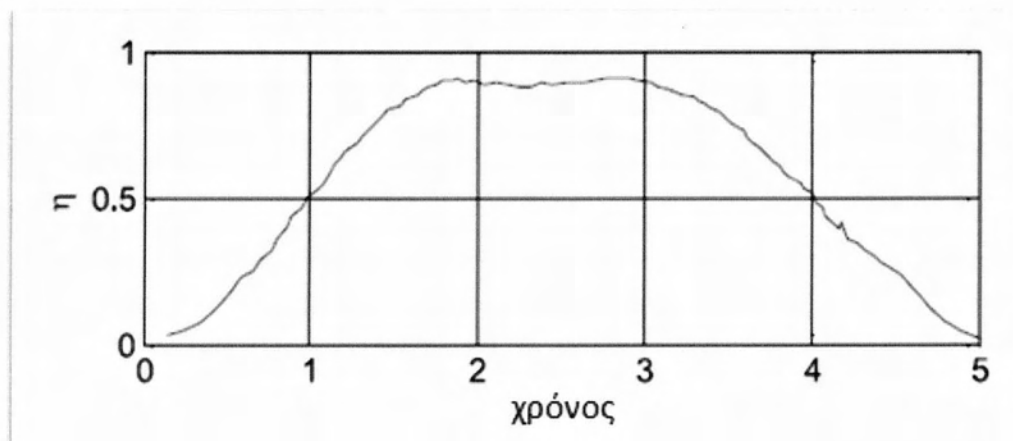
αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι για αυξημένη παροχή αέρα εντός του στροβίλου (μέγιστη ροή - κορυφή διαγράμματος – εικόνα 3.8) τότε η απόδοση του στροβίλου γίνεται μέγιστη. Αντιθέτως, όταν ο βαθμός απόδοσης είναι μικρός τότε η παροχή αέρα είναι μειωμένη. Στο παράδειγμά μας, ο μέσος βαθμός απόδοσης είναι περίπου 72% ο οποίος προσεγγίζει κατά πολύ τον μέγιστο που είναι 75,5%. Συγκρίνοντας τον μέσο με τον μέγιστο βαθμό απόδοσης, μπορούμε να συμπεράνουμε αρχικά ότι ένας απλός στρόβιλος Wells έχει πολύ υψηλό λόγο μετατροπής της ισχύος ακόμα και σε μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του. Δηλαδή μπορεί να μετατρέψει πολύ αποτελεσματικά την είσοδο (ενέργεια κυμάτων) σε αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 3.8 : μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τον συντελεστή ροής

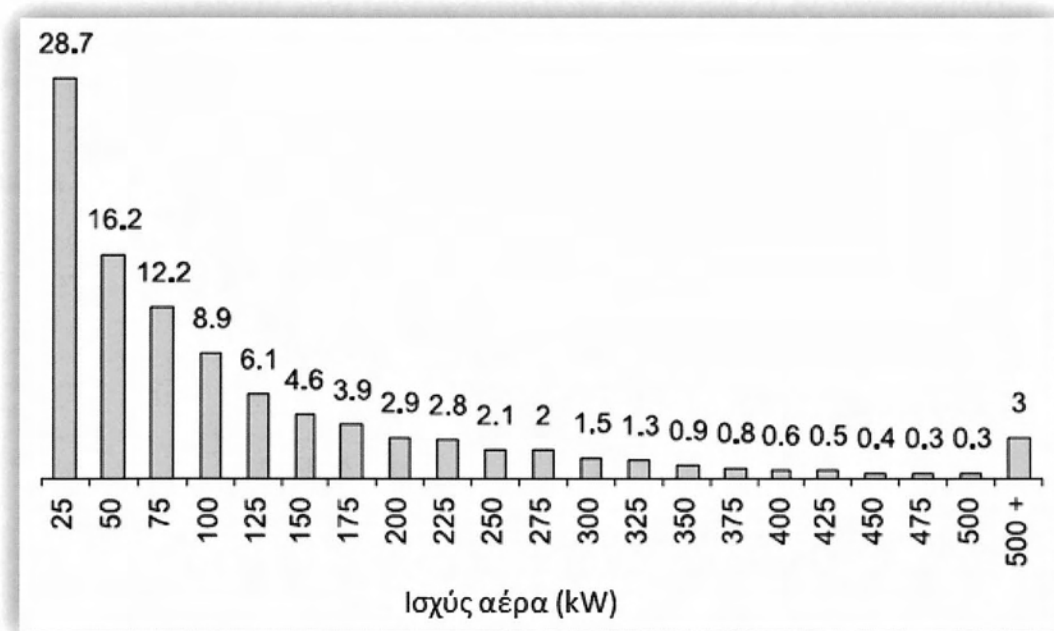


Εικόνα 3.9 : μεταβολή της παροχής αέρα με τον χρόνο



Εικόνα 3.10 : μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τον χρόνο

Σύμφωνα με τα παραπάνω λοιπόν, κατανοούμε ότι το σύστημα στροβίλου – γεννήτριας δε λειτουργεί απομονωμένα, αλλά παράγοντες όπως η ταλάντωση της στήλης ύδατος και η κίνηση των κυμάτων στη θάλασσα επηρεάζουν άμεσα την αποδοτικότητα του συστήματος. Υπάρχει λοιπόν ένα σημείο ταλάντωσης της υδάτινης στήλης κατά το οποίο ο βαθμός απόδοσης γίνεται βέλτιστος. Ένας στρόβιλος ο οποίος λειτουργεί σε υπερταλάντωση (ταλάντωση πάνω από το επιθυμητό σημείο) ή υποταλάντωση (ταλάντωση κάτω από το επιθυμητό σημείο) της στήλης ύδατος με έναν συντελεστή περίπου δύο, μπορεί να υποστεί μείωση της προσλαμβανόμενης ισχύς από τον εισερχόμενο αέρα της τάξεως του 15%. Επειδή λοιπόν η ενέργεια που περιέχεται στα θαλάσσια κύματα δεν είναι ενιαία και ισόμορφα κατανομημένη σε ολόκληρη την θάλασσα όλο τον χρόνο, κατά τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερα υπόψη και να μελετάται ο τρόπος αλληλεπίδρασης των θαλάσσιων κυμάτων και κατ επέκταση της ταλάντωσης εντός της στήλης ύδατος και του αέρα πάνω από αυτή, με την λειτουργία του χρησιμοποιούμενου στροβίλου, για διάφορες χρονικές περιόδους. Ενδεικτικά παραθέτουμε το διάγραμμα με τις διακυμάνσεις της ισχύος του αέρα (εικόνα 3.11) όπως αυτές μετρήθηκαν από τον Νοέμβριου 2001 μέχρι τον Μάρτιο 2003 στο σύστημα LIMPET. Παρατηρούμε ότι στα περισσότερα χρονικά διαστήματα η ισχύς δεν είναι πολύ υψηλή, ενώ σε κάποια άλλα αυξάνεται απότομα, ίσως λόγω κάποιου έντονου καιρικού φαινομένου όπως μια καταιγίδα.



Εικόνα 3.11 : κατανομή της ισχύος αέρα επί τις % (Νοεμβ. 2001 – Μαρτ. 2003)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι ο στρόβιλος Wells για να μπορέσει να προσλάβει όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα την ισχύ που περιέχεται στον συμπιεσμένο αέρα, θα πρέπει να λειτουργεί με τον βέλτιστο συντελεστή ροής “Φ”, ενώ ταυτόχρονα η στήλη ύδατος να ταλαντώνεται στο ιδανικό πλάτος ταλάντωσης για διάφορες κλιματικές συνθήκες.

Μπορεί ναδειχτεί ότι η ταλάντωση του στροβίλου Wells (c) είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητάς του (ω). Δηλαδή :

$$c = k\omega \quad (3.4)$$

Επίσης η αξονική ταχύτητα της ροής του αέρα από τον νόμο της συνέχειας είναι :

$$V_x = \frac{Q}{A} \Rightarrow Q = V_x A \quad (3.5)$$

Όπου :

- ♦ A : η κάθετη επιφάνεια στη ροή του αέρα

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.4) και (3.5) στην (3.2) έχουμε :

$$(3.2) \Rightarrow P = cQ^2 \Rightarrow P = k\omega(V_x A)^2 \quad (3.6)$$

Αν σκοπός είναι να επιτύχουμε μέγιστη επίδοση του στροβίλου με ρύθμιση του συντελεστή ροής “Φ” τότε έχουμε :

$$\frac{V_x}{V_t} = \Phi_{opt} \Rightarrow V_x = \Phi_{opt} V_t$$

Όμως :

$$V_t = r\omega$$

Με αντικατάσταση έχουμε :

$$V_x = \Phi_{opt} r\omega \quad (3.7)$$

Με αντικατάσταση της (3.7) στην (3.6) προκύπτει :

$$P = k\omega(\Phi_{opt} r\omega A)^2 = k^* \omega^3$$

Με

$$k^* = k\Phi_{opt}^2 r^2 A^2$$

Η παραπάνω σχέση μας δείχνει ότι για να επιτευχθεί μέγιστη επίδοση στο στρόβιλο, η γωνιακή ταχύτητά του πρέπει να είναι ανάλογη της ποσότητας $\sqrt[3]{P}$. Αν συγκρίνουμε μια επιθυμητή ταλάντωση στροβίλου του συστήματος LIMPET, με μια ιδανική υποθετική ταλάντωση η οποία έχει “ω” ανάλογο της ποσότητας $22P^{1/3}$, θα διαπιστώσουμε εύκολα ότι η ταλάντωση του συστήματος LIMPET προσεγγίζει κατά πολύ την ιδανική υποθετική. Αυτός είναι και ένας τρόπος να επιβεβαιώσουμε ότι ένας στρόβιλος Wells μπορεί να παράγει αποτελεσματικά ηλεκτρική ενέργεια υπό μια ευρεία γκάμα θαλάσσιων συνθηκών. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η χρήση συστημάτων με εναλλάκτες ηλεκτρικού ρεύματος. Σε αυτή τη περίπτωση είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η αλλαγή της ταχύτητας περιστροφής του στροβίλου κατά ένα συντελεστή περίπου ίσο με 4. Με αυτό τον τρόπο ο συντελεστής ροής “Φ” και η ταλάντωσή του στροβίλου θα μπορέσουν να διατηρηθούν στα επιθυμητά ιδανικά επίπεδα παρά τις ακραίες θαλάσσιες συνθήκες που μπορεί να υπάρξουν. [11]



Εικόνα 3.12 : Οι τρεις θάλαμοι συμπίεσης αέρα του συστήματος LIMPET [17]



Εικόνα 3.13 : Ο στρόβιλος Wells [17]

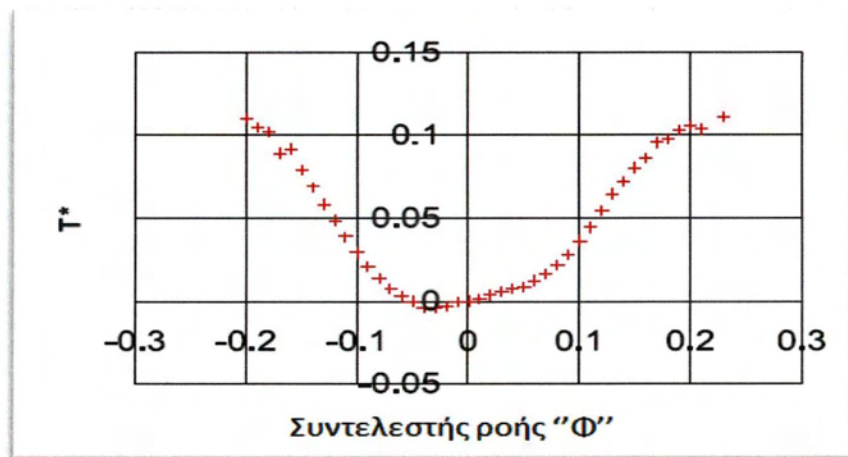
Παρακάτω παρουσιάζονται δύο διαγράμματα (εικόνα-3.14, εικόνα-3.15) στα οποία φαίνονται οι τυπικές καμπύλες της αδιάστατης ροπής και αδιάστατης πτώσης πίεσης αντίστοιχα του στρόβιλου Wells που χρησιμοποιείται στην εγκατάσταση LIMPET. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τύποι [12] :

$$T^* = \frac{T}{\rho \omega^2 r^5} \quad P^* = \frac{P}{\rho \omega^2 r^2}$$

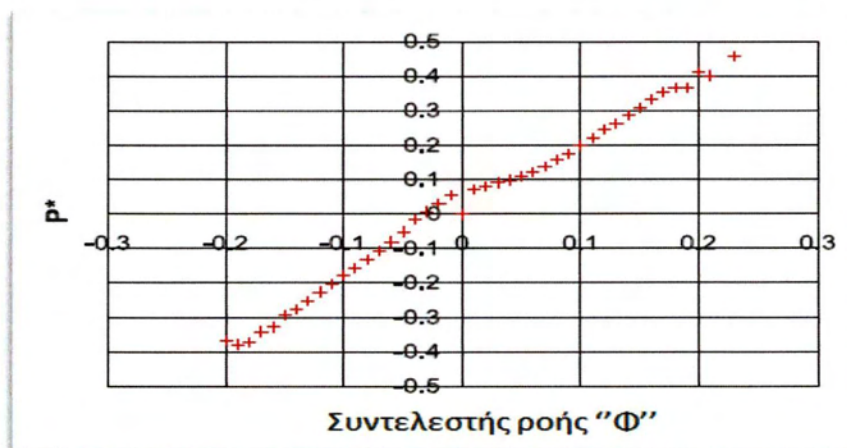
Όπου :

- T^* : αδιάστατη ροπή
- T : ροπή
- ρ : η πυκνότητα του αέρα
- ω : γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου
- r : η ακτίνα του στροβίλου
- P^* : αδιάστατη πτώση πίεσης
- P : πτώση πίεσης

Από το συνδυασμό αυτών των καμπυλών εκτιμάται ότι περίπου το 50% της συνολικής ισχύς η οποία περιέχεται στον αέρα μετατρέπεται σε ηλεκτρική.



Εικόνα 3.14 : μεταβολή αδιάστατης ροπής με τον συντελεστή ροής " Φ "



Εικόνα 3.15 : μεταβολή αδιάστατης πίεσης με τον συντελεστή ροής " Φ "

Πλεονεκτήματα στροβίλου Wells

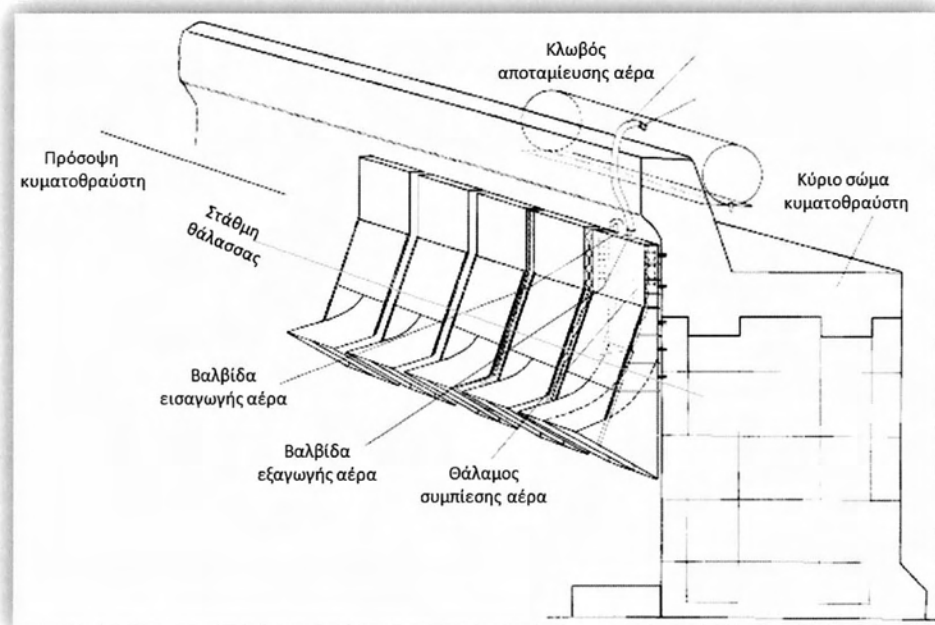
1. Δεν υπάρχει σύστημα μετάδοσης ταχύτητας (κιβώτιο ταχυτήτων)
2. Έλλειψη υδραυλικών συστημάτων
3. Καλή απόδοση σε μεταβλητή ροή αέρα
4. Λειτουργία με αέρα
5. Σταθερά πτερύγια
6. Απλή και στιβαρή κατασκευή
7. Υψηλή αξιοπιστία [16]

3.1.2.WECA

Το WECA (Wave Energy Conversion Activator) είναι μια κατασκευή για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Έχει αναπτυχθεί από την Ελληνική εταιρία DAEDALUS και η λειτουργία του βασίζεται στην αρχή της Π.Υ.Σ.. Η συσκευή βρίσκεται συνήθως εφαρμογή στη παράκτια ζώνη, ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη ζώνη ανοιχτής θαλάσσης.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Η βασική δομή του συστήματος WECA αποτελείται από ένα θάλαμο με κωνικό σχήμα. Ένα τμήμα του θαλάμου είναι βυθισμένο στη θάλασσα, ενώ το υπόλοιπο βρίσκεται πάνω από την επιφάνειά της. Το τμήμα του θαλάμου που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι γεμάτο με νερό, ενώ αυτό που βρίσκεται πάνω είναι γεμάτο με αέρα. Καθώς τα κύματα φτάνουν στον θάλαμο η στάθμη της θάλασσας ανυψώνεται εντός του θαλάμου και το νερό συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται από πάνω του. Εν ολίγοις το σύστημα λειτουργεί ως μια υδάτινη στήλη η οποία συμπιέζει τον αέρα. Ο συμπιεσμένος αέρας περνά από την βαλβίδα εξαγωγής και από εκεί αποθηκεύεται στον κλωβό αποθήκευσης αέρα. Όταν τα κύματα υποχωρούν, ανοίγει η βαλβίδα εισαγωγής για να εισαχθεί φρέσκος αέρας από το περιβάλλον στον κωνικό θάλαμο και να συνεχιστεί ομοίως η διαδικασία. Η παραπάνω περιγραφή γίνεται κατανοητότερη με την εικόνα-3.16 που ακολουθεί.



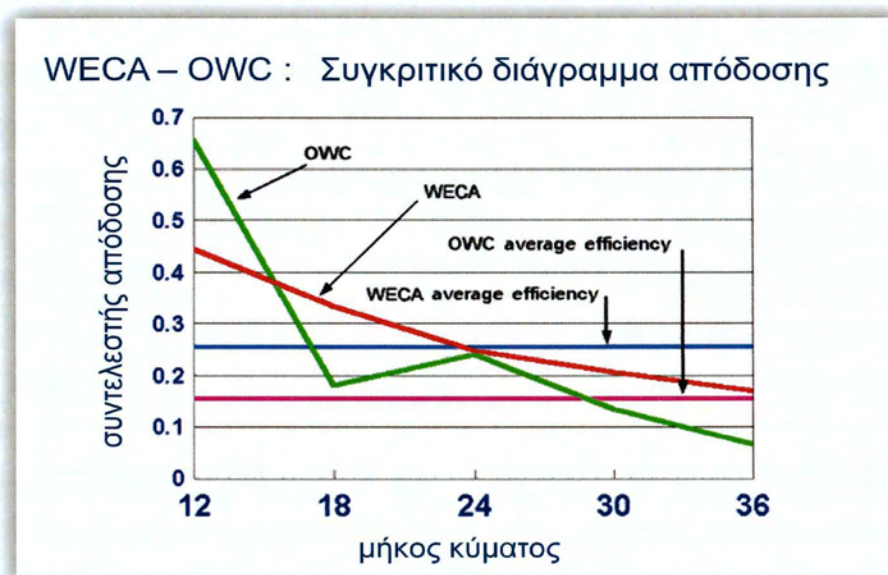
Εικόνα 3.16 : αρχή λειτουργίας συστήματος WECA [20]

Σε αυτή τη φάση του προγράμματος ανάπτυξης του WECA, έχει σχεδιαστεί ένα πειραματικό μοντέλο με διαστάσεις 7 μέτρα ύψος και 6 μέτρα πλάτος. Με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο μελετώνται διάφορες μηχανολογικές πτυχές του συστήματος και γίνονται προτάσεις βελτίωσής του. Οι βελτιώσεις γίνονται με γνώμονα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από εξομοιώσεις της λειτουργίας του συστήματος σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Το μοντέλο για το WECA το οποίο έχει προταθεί θα κατασκευαστεί από χάλυβα ώστε να μπορέσει να ενσωματωθεί εύκολα πάνω σε υπάρχοντες κυματοθραύστες. Το υλικό δεν είναι απαραίτητο να είναι χάλυβας. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε διαφορετικό υλικό αρκεί ο συνδυασμός, οικονομίας, αντοχής και καταλληλότητας για τον συγκεκριμένο σκοπό, που προσφέρει να μας εξυπηρετεί. Η αναμενόμενη ισχύς εξόδου είναι 20Kw.

Μέχρι στιγμή έχει ολοκληρωθεί ένα σημαντικό στάδιο της έρευνας για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση, το οποίο επιτρέπει την αρχική μοντελοποίηση και προσομοίωση της δυναμικής των ρευστών όπως αυτή αναμένεται να εμφανίζεται στις περιοχές εντός και εκτός των θαλάμων συμπίεσης του WECA. Πέραν από τα διάφορα προβλήματα της μηχανικής, που συνδέονται ως επί το πλείστον με τις αναπτυσσόμενες τάσεις, τη γεωμετρία της διάταξης και τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, παράλληλα μελετώνται και άλλες σημαντικές πτυχές οι οποίες έχουν εμφανιστεί. Αυτές σχετίζονται περισσότερο με το θεωρητικό υπόβαθρο των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών που διέπουν τη

συγκεκριμένη γεωμετρία και χρήζουν λύσης. Γι' αυτό τον λόγο η σχεδίαση του συστήματος έχει προσανατολιστεί και με γνώμονα την ύπαρξη φαινομένων όπως είναι αυτά του συντονισμού ρευστών με μεγάλη ταχύτητα εντός των αγωγών, τις επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσουν σύνθετες αντιστάσεις οι οποίες προκύπτουν από τον συνδυασμό των αντιστάσεων του υδροστατικού δυναμικού και της αντίστασης του κυματοθραύστη κ.λπ. Παρόλη την ύπαρξη των θεωρητικών προβλημάτων, τα οποία ωστόσο επιλύονται σχετικά γρήγορα, μέχρι τώρα έχει συσσωρευτεί αρκετή εμπειρία ώστε να γίνει εφικτή η βιομηχανική παραγωγή και εμπορευματοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται ο τρόπος που μεταβάλλεται ο συντελεστής απόδοσης με το μήκος κύματος, για το σύστημα WECA σε σχέση με κάποια κοινά συστήματα Π.Υ.Σ.. Παρατηρούμε ότι η απόδοση του WECA μειώνεται πιο γραμμικά όσο αυξάνεται το μήκος κύματος και είναι μεγαλύτερη από άλλα συστήματα Π.Υ.Σ., ωστόσο σε μικρά μήκη κύματος δε φαίνεται να είναι το ίδιο αποτελεσματικό. [18]



Εικόνα 3.17 : συγκριτικό διάγραμμα συντελεστή απόδοσης – μήκος κύματος [20]

3.2. Τεχνολογίες Υπέρβασης / Υπερύψωσης

3.2.1.SSG

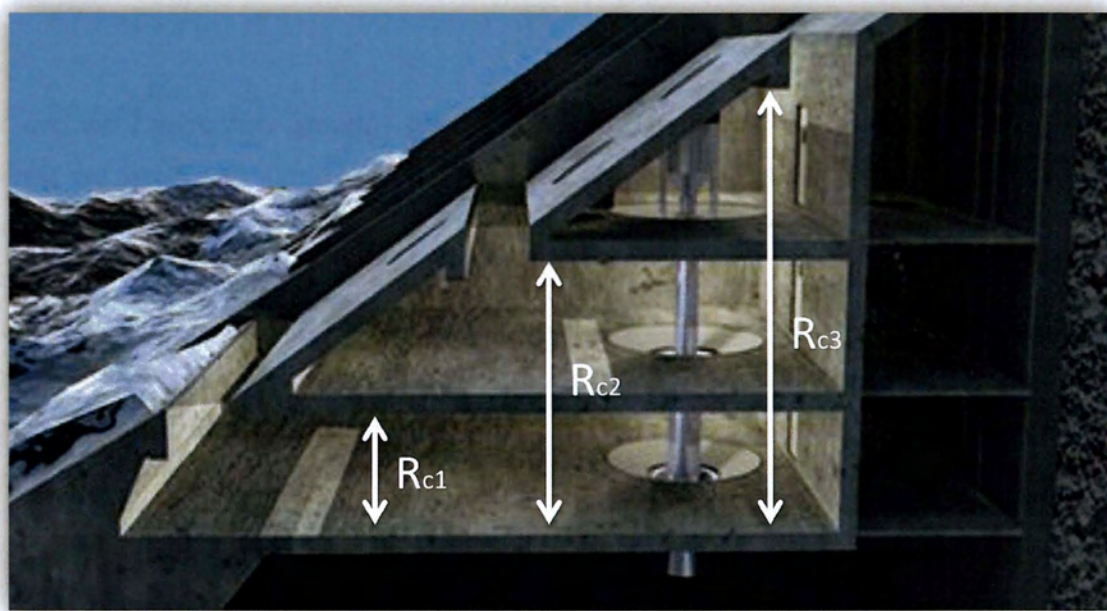
Το SSG (Seawave Slot Cone Generator) είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος βασίζεται στην αρχή της υπέρβασης των θαλάσσιων κυμάτων. Την άνοιξη του 2004 συστάθηκε η εταιρεία "WAVEenergy AS" για την ανάπτυξη και την υλοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Τη χρηματοδότηση του προγράμματος έχει αναλάβει

μερικώς η Ευρωπαϊκή Κομισιόν FP6-2004 για την εγκατάσταση μιας μονάδας στο νησί Kvitsoy της Νορβηγίας. Οι κύριοι συμμετέχοντες στην ανάπτυξη του SSG είναι το Πανεπιστήμιο Aalborg DK, το οποίο έχει αναλάβει την μελέτη της υδραυλικής απόδοσης του συστήματος, ενώ το Πανεπιστήμιο του Μονάχου και της Νορβηγίας (University for science and technology) την ανάπτυξη των στροβίλων που θα χρησιμοποιηθούν. Στόχος είναι η ονομαστική ισχύς εξόδου να βρίσκεται στα 150kW.

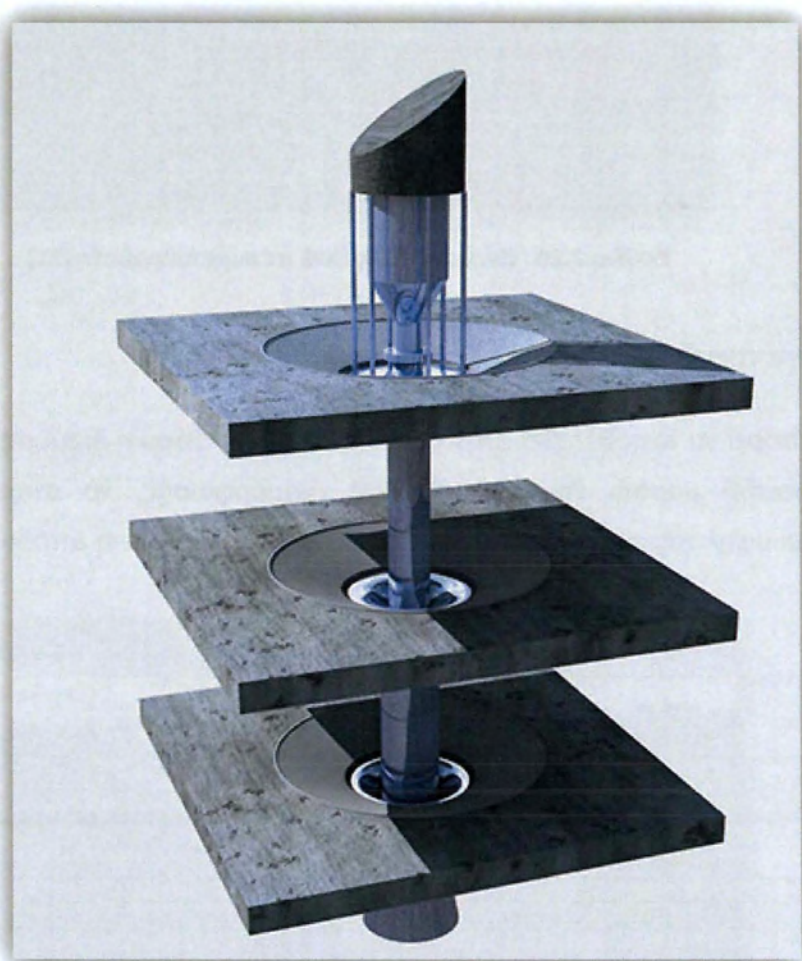
Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το SSG αποτελείται από έναν αριθμό πολλαπλών δεξαμενών οι οποίες είναι τοποθετημένες η μια πάνω στην άλλη. Το νερό ανάλογα με το ύψος του κύματος που θα προσκρούσει, εισέρχεται και αποθηκεύεται σε μια εκ των δεξαμενών αποθηκεύοντας παράλληλα και την περιεχόμενη στα κύματα ενέργεια με τη μορφή διαφοράς δυναμικού. Η χρήση των πολλαπλών δεξαμενών αποσκοπεί στην επίτευξη υψηλότερου συνολικού βαθμού απόδοσης από ότι αν χρησιμοποιούνταν μόνο μια. Κάθετα στις δεξαμενές είναι τοποθετημένος ένας καινοτόμος πολυμηματικός στρόβιλος μέσω του οποίου διέρχεται το νερό που έχει αποθηκευθεί στις εν λόγω δεξαμενές και με τη περιστροφή της πτερωτής του στροβίλου είναι εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πολυμηματικός στρόβιλος (Multi Stage Turbine – MST) έχει τις πτερωτές του τοποθετημένες σε έναν κοινό άξονα ώστε να αποφεύγεται ο μεγάλος αριθμός των σταματημών/εκκινήσεων του και να δουλεύει ακόμα και αν δεν είναι όλες οι δεξαμενές γεμάτες. Έτσι επιτυγχάνεται υψηλός βαθμός εκμετάλλευσής του. Στο αρχικό ακόμα στάδιο προτού ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του πολυμηματικού στροβίλου έχει προταθεί ως εναλλακτική λύση η χρήση τεσσάρων υδροστροβίλων Καπλάν (δύο στη πρώτη δεξαμενή, ενός στη δεύτερη και ενός στη τρίτη) και μετέπειτα η αντικατάστασή τους με δύο πολυμηματικούς υδροστροβίλους. Ο σχεδιασμός της κατασκευής και η χρήση οπλισμένου σκυροδέματος σαν υλικό κατασκευής συνεισφέρει θετικά στη στιβαρότητα και την αξιοπιστία, με τον στρόβιλο και το σύστημα ελέγχου ροής νερού στις δεξαμενές να είναι τα μοναδικά κινούμενα μέρη της συσκευής. Αυτό είναι ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας μιας και τα κινούμενα μέρη είναι αυτά που επιβαρύνονται περισσότερο σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων. Στις εικόνες 3.18, 3.19 βλέπουμε μια αναπαράσταση του συστήματος SSG και του πολυμηματικού στροβίλου αντίστοιχα από τα υπάρχοντα σχέδια. [19]

Το SSG εκτός της τοποθέτησής του στην ακτογραμμή σε συνδυασμό με κυματοθραύστες, βρίσκει εφαρμογή με τις ανάλογες μετατροπές σε παράκτιες και υπεράκτιες περιοχές.



Εικόνα 3.18 : Τομή του συστήματος SSG [21]



Εικόνα 3.19: Πολυτμηματικός υδροστρόβιλος (MST) με τη γεννήτρια στη κορυφή του [21]

SSG σε κυματοθραύστη

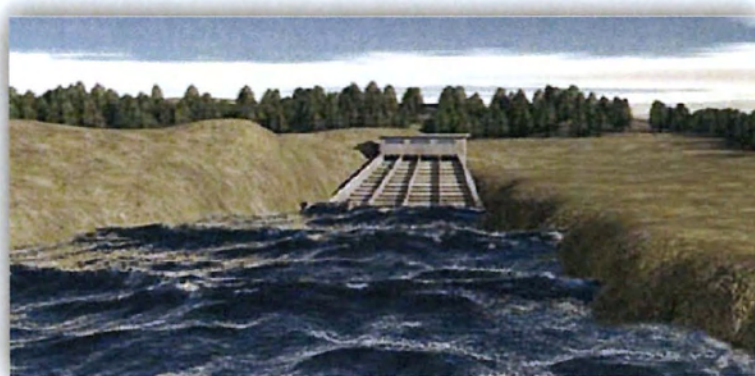
Το SSG αρχικά θα κατασκευάζεται σε ξεχωριστά τμήματα στη στεριά και στο τέλος θα συναρμολογείται και θα ενσωματώνεται σε κυματοθραύστες έτσι ώστε να μειώνεται το κόστος κατασκευής. Το SSG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και καθαρού πόσιμου νερού μέσω όσμωσης. Η χωρητικότητα και η διαμόρφωση των δεξαμενών θα συνεισφέρουν σημαντικά στην εξομάλυνση των εισερχόμενων κυμάτων και στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το SSG μπορεί να αποτελεσει μια εγκατάσταση εναλλακτικής πηγής ενέργειας για νησιά που χρησιμοποιούν ακριβό ντίζελ ή φυσικό αέριο για παραγωγή ηλεκτρισμού, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος (μαζί και το φόρο για εκπομπές CO₂). [21]



Εικόνα 3.20 : Ενσωμάτωση SSG σε κυματοθραύστη [21]

SSG στην ακτή

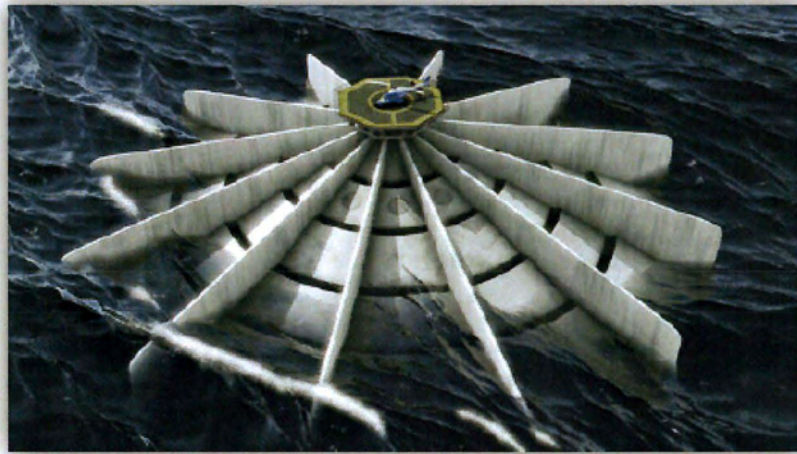
Το SSG μπορεί να τοποθετηθεί στην ακτή σε περιοχές όπου η διαμόρφωση του εδάφους έχει σφηνοειδή μορφή. Λόγω αυτής της διαμόρφωσης, το αποτέλεσμα είναι να παράγονται υψηλότερα κύματα και κατ'επέκταση να αυξάνεται η απόδοση του SSG. [21]



Εικόνα 3.21 : SSG στην ακτή [21]

SSG στην ανοιχτή θάλασσα

Η εγκατάσταση του SSG στην ανοιχτή θάλασσα μπορεί να είναι είτε πλωτή είτε σταθερή. Για τη σταθερή εγκατάσταση ως βάση της μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πλατφόρμα πετρελαίου επιμηκύνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Το SSG ανοιχτής θαλάσσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία θα παρέχεται σε άλλες κοντινές εγκαταστάσεις και για τη παραγωγή υδρογόνου το οποίο μπορεί να μεταφερθεί μέσω πλοίων ή σωληνώσεων σε μεγαλύτερους σταθμούς επεξεργασίας που βρίσκονται στην ακτή. [19],[20]



Εικόνα 3.22 : SSG στην ανοιχτή θάλασσα [21]

Απόδοση του SSG

Η απόδοση του μετατροπέα κυματικής ενέργειας SSG είναι εύκολα υπολογίσιμη λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική απόδοση του σε τέσσερα διαφορετικά βήματα. Με τη χρήση του τύπου :

$$n_{crest} = \frac{P_{crest}}{P_{wave}}$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τον μέγιστο βαθμό υδραυλικής απόδοσης (βαθμός υπερπήδησης).

Όπου :

- ♦ P_{crest} : Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να παραχθεί
- ♦ P_{wave} : Η ισχύς που περιέχεται σε ένα κύμα

Η μέγιστη ισχύς η οποία μπορεί να παραχθεί υπολογίζεται από τον τύπο :

$$P_{crest} = \sum_{j=1}^3 q_{ov,j} R_{c,j} \rho g$$

Η ισχύς που περιέχεται στο κύμα που προσκρούει υπολογίζεται από τον τύπο :

$$P_{wave} = \sum_{j=1}^3 \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_E$$

Όπου :

- $q_{ov,j}$: Η παροχή νερού σε κάθε δεξαμενή [m^3/s]
- H_s : Το ύψος του κύματος [m]
- T_E : Η περίοδος [s]
- $R_{c,j}$: ύψος δεξαμενής από την επιφάνεια του νερού (εικόνα 23) [m]
- ρ : πυκνότητα νερού [kg/m^3]
- g : επιτάχυνση της βαρύτητας [m/s^2]

Με τον τύπο :

$$n_{res} = \frac{P_{res}}{P_{wave}}$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε τη μετατρεπόμενη ισχύ του κύματος σε ισχύ δυναμικού η οποία αποθηκεύεται εντός των δεξαμενών.

Με :

$$P_{res,j} = \rho g H_j q_j$$

Όπου :

- P_{res} : η δυναμική ισχύς λόγω υπερπήδησης του νερού μείων την ενέργεια λόγω μη πλήρωσης της δεξαμενής με νερό.

Με τον τύπο :

$$n_{turb} = \frac{P_{tur}}{P_{wave}}$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε πόσο αποδοτικά μετατρέπεται η ισχύς των κυμάτων σε μηχανική ισχύ στον άξονα του στροβίλου.

Με τον τύπο :

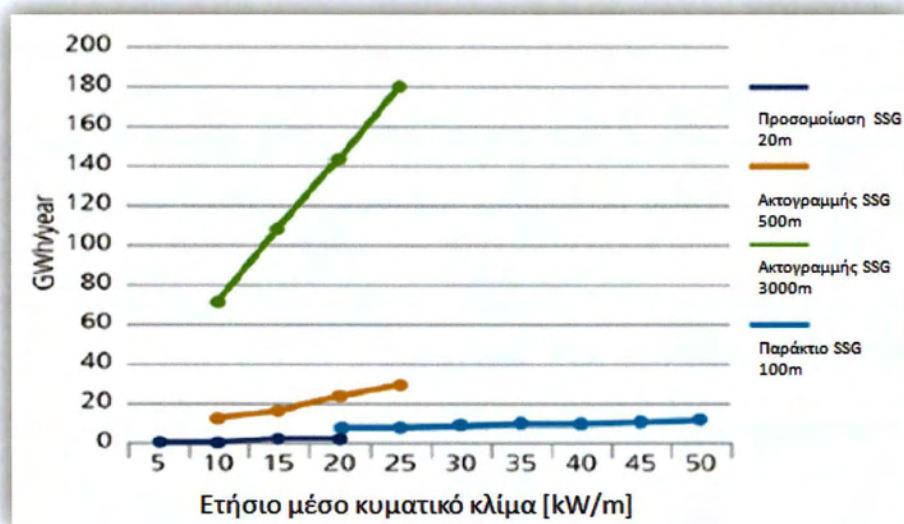
$$n_{net} = \frac{P_{net}}{P_{wave}}$$

Μπορούμε να υπολογίσουμε το πόσο αποδοτικά μετατρέπεται η ισχύς των κυμάτων σε ηλεκτρική ισχύ που θα τροφοδοτήσει το δίκτυο.

Η συνολική υδραυλική απόδοση σε όλες τις θαλάσσιες περιοχές εκτιμάται ότι είναι της τάξης του 50%. Η συνολική απόδοση αναμένεται να προσεγγίζει το 22%. Στον πίνακα στην εικόνα 3.23 έχει καταγραφεί η ισχύς (kW) για διάφορα ύψη και περιόδους κυμάτων. Οι τιμές έχουν υπολογιστεί για μια εγκατάσταση SSG πλάτους 500m του οποίου η μέγιστη ισχύς είναι 20MW. [19]

		Περίοδος Ισχύος [s]												
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
Υψος κύματος [m]	1	99	109	119	129	139	149	159	169	189	198	208	218	228
		397	437	476	516	556	595	635	675	754	794	833	873	913
	2	893	982	1072	1161	1250	1340	1429	1518	1697	1786	1875	1965	2054
		1588	1746	1905	2064	2223	2381	2540	2699	3016	3175	3334	3493	3651
	3	2481	2729	2977	3225	3473	3721	3969	4217	4713	4961	5209	5457	5705
		3572	3929	4287	4644	5001	5358	5715	6073	6787	7144	7501	7859	8216
	4	4862	5348	5834	6321	6807	7293	7779	8265	9238	9724	10210	10696	11183
		6350	6985	7620	8256	8891	9526	10161	10796	12066	12701	13336	13971	14606
	5	8037	8841	9645	10448	11252	12056	12860	13663	15271	16074	16878	17682	18486
		9923	10915	11907	12899	13892	14884	15876	16868	18853	19845	20000	20000	20000
	6	12006	13207	14407	15608	16809	18009	19210	20000	20000	20000	20000	20000	20000
		14288	15717	17146	18575	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	7	16769	18446	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
		19448	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	8	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
		20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000

Εικόνα 3.23 : αναμενόμενη παραγωγή ισχύος SSG πλάτους 500m [20]



Εικόνα 3.24 : Εκτιμώμενη ετήσια ηλεκτρική παραγωγή για διάφορα κυματικά κλίματα

Γενικά συμπεράσματα για το σύστημα SSG

Όλες οι βασικές μελέτες για τη λειτουργία του συστήματος έχουν ολοκληρωθεί. Όσο αφορά τη παραγωγή της συσκευής [19],[20],[21] :

- Έχουν συλλεχθεί τα δεδομένα για την κυματική δραστηριότητα της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί αρχικά το SSG από μετρήσεις. Τα δεδομένα έχουν επεξεργαστεί και έχει βρεθεί το μέσω ύψος κυμάτων, η περίοδος και άλλα σημαντικά χρήσιμα στοιχεία που επηρεάζουν τη κατασκευή.
- Έχουν γίνει εκτενείς δοκιμές με σκοπό τη βελτιστοποίηση της υδραυλικής απόδοσης της κατασκευής για ύψη ελεύθερης επιφάνειας 1.5m, 3m, 5m (R_{c1} , R_{c2} , R_{c3} αντίστοιχα)
- Έχει αποφασιστεί η στρατηγική τοποθέτησης των στροβίλων. Αρχικά τέσσερις Kaplan και έπειτα αντικατάστασή τους με 2 πολυμηματικούς MST συνολικής εγκατεστημένης ισχύς 150kW.
- Οι εργασίες που έχουν γίνει για τη βελτιστοποίηση του συστήματος καθώς και αυτές για τη στρατηγική τοποθέτησης των στροβίλων βρίσκονται ακόμα στο αφορούν τη προσομοίωση σε υπολογιστή. Δεν έχουν γίνει εργαστηριακές προσομοιώσεις.
- Από τις διάφορες μετρήσεις και υπολογισμούς που έχουν γίνει, εκτιμάται ότι η παραγόμενη ισχύς ενός SSG 10m πλάτους είναι περίπου 320 MWh/χρόνο

3.3. Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης

3.3.1.LabBuoy

Το LabBuoy είναι ένα ερευνητικό μοντέλο που αφορά την εγκατάσταση ενός μετατροπέα της κυματικής ενέργειας στην ακτή. Ο μετατροπέας είναι πλωτού τύπου ενώ το σύστημα μετάδοσης και το σύστημα μετατροπής τοποθετούνται πάνω σε έναν κυματοθραύστη. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει σαν αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγή ενέργειας λόγω της ανάκλασης των κυμάτων στην επιφάνεια του κυματοθραύστη, την αυξημένη αξιοπιστία και την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. [22]

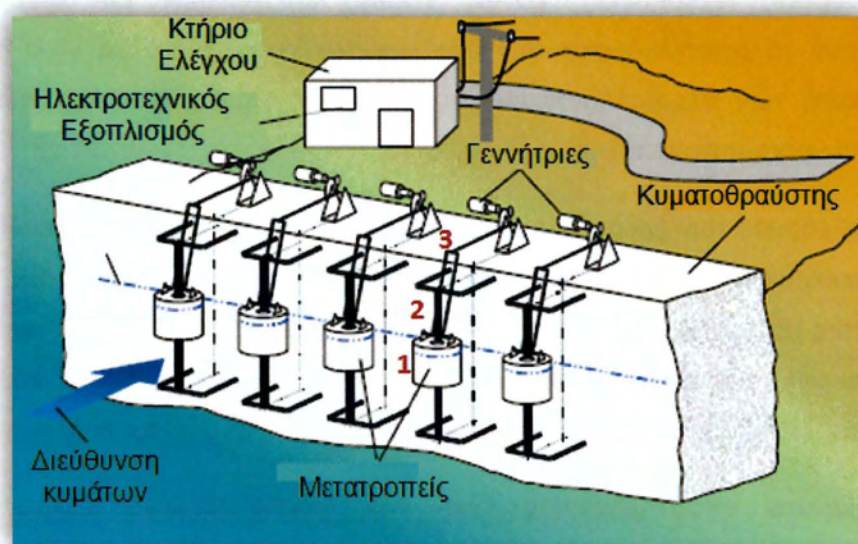
Οι βασικοί στόχοι του ερευνητικού προγράμματος είναι :

- Η ανάπτυξη αξιόπιστων υπολογιστικών μοντέλων εξομοίωσης για τη σχεδίαση του συστήματος και για τη πρόβλεψη των διαφόρων αναπτυσσόμενων φορτίων.
- Η επαλήθευση των υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικές διατάξεις

- ♦ Εξέταση διαφόρων πιθανών σεναρίων λειτουργίας του συστήματος (π.χ. διάφορα ύψη κύματος κ.λπ.) για εύρεση της μέγιστης ισχύος που μπορεί να παραχθεί και την αξιοπιστία του συστήματος σε αυτές τις συνθήκες.
- ♦ Εξέταση των περιβαλλοντικών και οικονομικών οφελών που μπορεί να υπάρξουν από τη λειτουργία της εγκατάστασης σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Ο περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του LabBuoy θα γίνει με τη βοήθεια της εικόνας 3.25. Καθώς τα κύματα πλησιάζουν τους μετατροπείς (σημείο 1), αυτοί κάνουν μια παλινδρομική κίνηση (πάνω - κάτω) η οποία ενισχύεται και από την μετέπειτα πρόσκρουση των κυμάτων στον κυματοθραύστη. Οι μετατροπείς είναι συνδεδεμένοι μέσω αρθρωτού μηχανισμού (σημείο 2) με ένα κιβώτιο ταχυτήτων (σημείο 3). Αυτό με τη σειρά του συνδέεται με μια γεννήτρια η οποία παράγει ρεύμα από τη κίνηση που λαμβάνει από το κιβώτιο ταχυτήτων και τροφοδοτεί το δίκτυο. [22]



Εικόνα 3.25 : σχηματική αναπαράσταση της τεχνολογίας του LabBuoy [21]

Η επίτευξη των στόχων του προγράμματος έχει γίνει με τη βοήθεια δύο διαφορετικών προσεγγίσεων. Η μια είναι η κατασκευή μαθηματικών μοντέλων και η άλλη δοκιμαστικών φυσικών μοντέλων στο εργαστήριο.

Κατά τη πρώτη προσέγγιση, αυτή των μαθηματικών μοντέλων, έχει γίνει προσομοίωση της λειτουργίας της συσκευής υπό διάφορες κυματικές συνθήκες, όπως αυτές

συναντώνται σε ακτογραμμές της Ευρώπης. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου το οποίο αναπτύχθηκε είναι :

- Η υδροδυναμική αλληλεπίδραση που αναπτύσσεται μεταξύ των μετατροπών και του κυματοθραύστη
- Η πρόβλεψη των αναπτυσσόμενων τάσεων
- Η ανταπόκριση του συστήματος
- Γραμμικός, μη γραμμικός και εκθετικός έλεγχος της ισχύος

Κατά τη δεύτερη προσέγγιση, η έρευνα γίνεται με βάση ένα φυσικό μοντέλο το οποίο αποτελείται από πέντε μετατροπείς στη σειρά μπροστά από έναν κατακόρυφο τοίχο. Οι ηλεκτρικές γεννήτριες οι οποίες είναι προσαρμοσμένες στους μετατροπείς προσομοιώθηκαν από ηλεκτρομηχανικές συσκευές αυτόματου ελέγχου της ταχύτητας. Τα πειράματα διεξήχθησαν υπό διάφορες κυματικές συνθήκες που συναντώνται σε Ευρωπαϊκές ακτογραμμές.

Παράλληλα εξετάστηκαν οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και οι κανονισμοί πιστοποίησης της παρούσας τεχνολογίας, καθώς επίσης διεξήχθησαν και έρευνες οι οποίες συνδυάζουν τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων ώστε να γίνει αποτίμηση των οικονομικών, των περιβαλλοντικών και των κοινωνικών αποτελεσμάτων τα οποία θα επιφέρει η χρησιμοποίηση της.

Τα αποτελέσματα των ερευνών επιβεβαίωσαν επίσης την αξιοπιστία και τη βιωσιμότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η επιβεβαίωση του μαθηματικού μοντέλου του συστήματος μέσω της πειραματικής διαδικασίας είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός εργαλείου για τη πραγματική σχεδίαση συστημάτων μετατροπής σε πλήρη κλίμακα τα οποία προορίζονται να χρησιμοποιηθούν ως τμήματα μεγαλύτερων έργων.

Τα πειράματα υποστηρίχθηκαν από ένα διασυνδεδεμένο εργαστηριακό δίκτυο επιτρέποντας τη παρακολούθηση, τον έλεγχο, τη μεταφορά δεδομένων και την επικοινωνία μεταξύ των συνεταίρων του προγράμματος.

Στο πρόγραμμα ανάπτυξης του LabBuoy συμμετείχαν έξι οργανισμοί από τέσσερις Ευρωπαϊκές χώρες :

- Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε – Ελλάδα) : έκανε επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης, ανάλυση του κύκλου ζωής της και μελέτες για τη δυνατότητα πρακτικής επίτευξης της τεχνολογίας.
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Ε.Μ.Π. – Ελλάδα) : έκανε υδροδυναμική ανάλυση, μοντελοποίηση της συσκευής και πειράματα

- Athena SA (Ελλάδα) : ανέλαβε την κατασκευή του φυσικού μοντέλου και έκανε διάφορες μελέτες για την υλοποίηση της τεχνολογίας
- Εταιρεία Ramboll (Δανία) : έκανε μοντελοποίηση της συσκευής και σχεδίαση του φυσικού μοντέλου
- Queen's University College (Ηνωμένο Βασίλειο) : έκανε μαθηματική και πειραματική μοντελοποίηση των ηλεκτρικών συστημάτων
- University College Cork (Ιρλανδία) : έκανε αποτίμηση της παραγόμενης ενέργειας, του οικονομικού και κοινωνικού οφέλους

Αριθμητικό Μοντέλο

Το μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης του LabBuoy αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, ένα υδροδυναμικό-κινηματικό και ένα ηλεκτρικό. Το υδροδυναμικό – κινηματικό μοντέλο έχει αναπτυχθεί με τη βοήθεια της Fortran και του Matlab και περιγράφει την παλινδρομική κίνηση του κάθε μετατροπέα. Κατά τη μοντελοποίηση έχει ληφθεί σοβαρά υπόψη η αλληλεπίδραση μεταξύ μετατροπέων και κυματοθραύστη, επιλύοντας την διαφορική εξίσωση διάθλασης των κυμάτων πρώτης τάξης.

Για το μοντέλο της ηλεκτρικής γεννήτριας κατασκευάστηκε μια διάταξη η οποία τοποθετήθηκε εντός μιας δεξαμενής παραγωγής τεχνητών κυμάτων και έγιναν πειράματα. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το Matlab για την επίλυση των εξισώσεων

Το αποτέλεσμα του αριθμητικού μοντέλου έδειξε ότι υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ του πλάτους της ταλάντωσης και της αδράνειας του συστήματος, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο. Με τις κατάλληλες ρυθμίσεις αυτών των παραμέτρων σε σχέση με τη συχνότητα πρόσκρουσης των κυμάτων έχουμε ως αποτέλεσμα τον συντονισμό του συστήματος και κατ επέκταση τη παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος [22]

Φυσικό Μοντέλο

Το φυσικό μοντέλο είναι κλίμακας 1:15 και αποτελείται από πέντε μετατροπείς τοποθετημένους σε σειρά. Έχει τοποθετηθεί σε μια δεξαμενή παραγωγής κυμάτων στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και έχει διεξαχθεί μια σειρά πειραμάτων για διάφορες κυματικές καταστάσεις. Ο βασικός σκοπός για τον οποίο διεξάχθηκαν τα πειράματα ήταν για να βρεθεί η απόκλιση από τα υπολογιστικά αποτελέσματα. [22]

Κάθε μετατροπέας είναι εξοπλισμένος με τους εξής αισθητήρες :

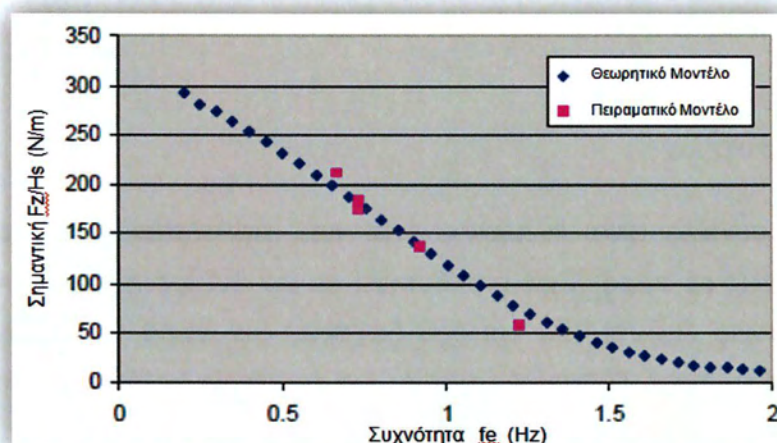
- Αισθητήρας δύναμης για τη μέτρηση της κατακόρυφης δύναμης που ασκεί το πλωτό σώμα
- Αισθητήρας ο οποίος υπολογίζει τη θέση του βραχίονα κάθε στιγμή
- Μετρητής για τη μέτρηση της στιγμιαίας περιστροφικής ταχύτητας του βραχίονα κάθε μοντέλου



Εικόνα 3.26 : τμήματα του πειραματικού μοντέλου LabBuoy

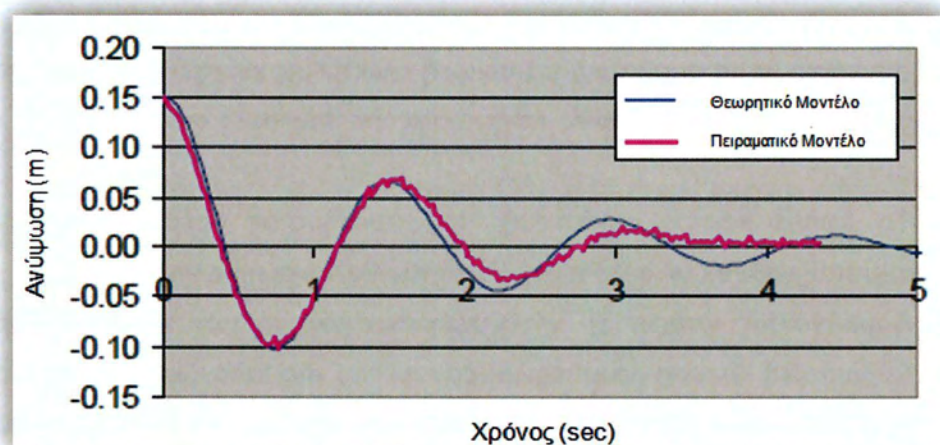
Σύγκριση αποτελεσμάτων Αριθμητικού – Πειραματικού μοντέλου

Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των αριθμητικών αποτελεσμάτων και την ικανότητα του αριθμητικού μοντέλου να προβλέψει τη συμπεριφορά της συσκευής. Παρακάτω μπορούμε να παρατηρήσουμε την απόκλιση η οποία υπάρχει μεταξύ αριθμητικού και πειραματικού μοντέλου για διάφορες μετρήσεις που έγιναν. [22]



Εικόνα 3.27 : Σημαντικές δυνάμεις διάθλασης (βάθος νερού : 0,50m)

Στο διάγραμμα της εικόνας 3.28 γίνεται σύγκριση μεταξύ αριθμητικού και πειραματικού μοντέλου για μια ελεύθερη ταλάντωση. Παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε σχέση με αυτά του αριθμητικού μοντέλου. Η ασυμφωνία των αποτελεσμάτων που υπάρχει στο τέλος του διαγράμματος για τα δύο μοντέλα πιθανότατα να οφείλεται από μη γραμμικές δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στα μηχανικά μέρη του συστήματος και οι οποίες δε μπορούσαν να προβλεφθούν ώστε να συμπεριληφθούν στο αριθμητικό μοντέλο. Παρόλα αυτά, η απόκλιση δεν είναι μεγάλη και το αριθμητικό μοντέλο απεδείχθη ότι παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Εικόνα 3.28 : ταλάντωση πλωτήρα, σύγκριση θεωρητικού – αριθμητικού μοντέλου

Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Βιωσιμότητα και Οικονομία

Σύμφωνα με μελέτες που έγιναν για την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα της συσκευής προέκυψαν συνοπτικά τα παρακάτω στοιχεία [22] :

- Με κάποιες μετατροπές στο αρχικό σχέδιο, το LabBuoy καθίσταται μια οικονομική, ασφαλή, αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική πηγή ενέργειας. Οι βασικές επιδράσεις της τεχνολογίας είναι η οπτική και ακουστική ρύπανση, η ενόχληση της θαλάσσιας πανίδας και η αναδιαμόρφωση της ακτής εγκατάστασης.
- Η οπτική και ακουστική επίδραση εκτιμάται ότι μπορεί να αντιμετωπιστεί σχετικά εύκολα. Με τη κατάλληλη διαμόρφωση ενός κυματοθραύστη και με τη χρήση ακουστικής μόνωσης είναι εφικτή η πλήρης εξάλειψη αυτών των προβλημάτων. Όσο αφορά την ενόχληση της θαλάσσιας πανίδας θα πρέπει να γίνουν εκτενέστερες έρευνες για τον τρόπο που η τεχνολογία την επιδρά σε αυτή.
- Η χρήση αλουμινίου για τη κατασκευή των μετατροπών θα αύξανε σημαντικά το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Γι' αυτό τον λόγο θα χρησιμοποιηθεί

σίδηρος ο οποίος είναι οικονομικότερος, αλλά και φιλικότερος στο περιβάλλον. Επίσης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ανακυκλώσιμα υλικά. Σε αυτή τη περίπτωση κάτι τέτοιο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην αρχική μελέτη

- Ανάλογα με το επίπεδο της ισχύς των κυμάτων της περιοχής, το κόστος παραγωγής της τεχνολογίας έχει υπολογιστεί ότι κυμαίνεται περίπου από 0,07 euro/kWh (για 45kW/m) έως 0,09 euro/kWh (για 15kW/m). Παρόλο που το κόστος παραγωγής σε σχέση με το συμβατικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (περίπου 0,04euro/kWh) είναι ακριβότερο, παραμένει μικρότερο σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μετατροπής κυματικής ενέργειας ή φωτοβολταϊκών. Με μια ανάλυση του κύκλου ζωής διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία, σε σύγκριση με τη συμβατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να μειώσει τις αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε περιοχές που πάσχουν έντονα από αυτές.
- Το υψηλό κόστος κατασκευής του συστήματος βρέθηκε ότι οφείλεται στον κυματοθραύστη, γι' αυτό η σχεδιάσή του θα πρέπει να επανεξετασθεί
- Λαμβάνοντας υπόψη τη διαθέσιμη ακτογραμμή των 180 χιλιομέτρων για την Ευρωπαϊκή Ένωση (συμπεριλαμβανομένου της Ισλανδίας και της Νορβηγίας), η αρχική αγορά αναμένεται να ισοδυναμεί με 24.000 μετατροπείς με συνολική ισχύ εξόδου από 2,5 έως 3 GW και με συνολική ετήσια απόδοση έως από 11 έως 14 TWh.

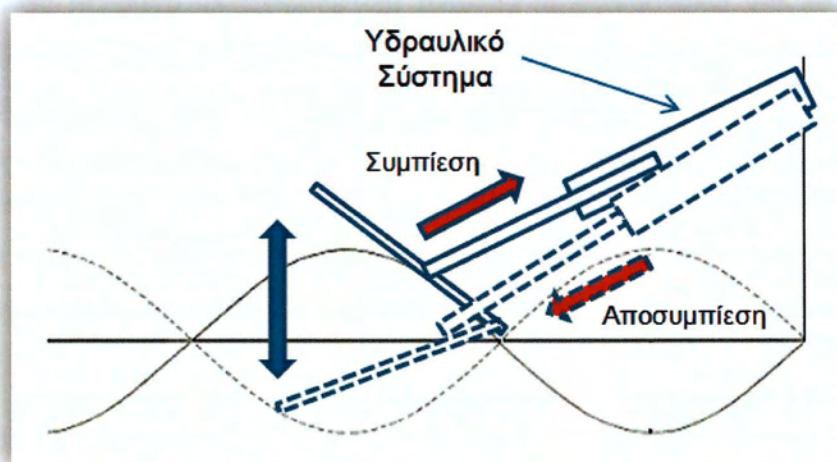
3.3.2. SDE

Το SDE είναι ένας μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων που τοποθετείται στην ακτογραμμή σε κυματοθραύστες. Η τεχνολογία έχει εφευρεθεί από τον Samuel Ovadia και έχει κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας με αριθμό U.S. Patent No. 5.461.862. Το SDE εγγυάται τη χαμηλότερη τιμή στην αγορά όσο αφορά το λειτουργικό κόστος και το κόστος κατασκευής.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Η συσκευή SDE αποτελείται από μια μεταλλική πλάκα η οποία τοποθετείται στην επιφάνεια της θάλασσας. Το ένα άκρο της επιφάνειας είναι ελεύθερο, ενώ το άλλο είναι συνδεδεμένο με ένα σύστημα υδραυλικών αντλιών. Καθώς τα κύματα φτάνουν στο ελεύθερο άκρο, αυτό "αναδιπλώνεται" και το αποτέλεσμα είναι η συμπίεση ή

αποσυμπίεση του υδραυλικού συστήματος που βρίσκεται στο άλλο άκρο. Αυτή η συμπίεση / αποσυμπίεση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ μέσω μιας ηλεκτρικής γεννήτριας. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος, καθώς και τη ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ενέργεια. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται πιο παραστατικά ο τρόπος λειτουργίας του [23] :



Εικόνα 3.29 : Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του SDE



Εικόνα 3.40 : Εγκατάσταση SDE στο Τελ Αβίβ [23]

Η τεχνολογία του SDE παρόλα τα αρκετά κινητά μέρη της μέχρι στιγμής έχει αποδειχθεί αξιόπιστη και λειτουργεί απροβλημάτιστα μέχρι και για 8 μέτρα ύψος κύματος. Σε περίπτωση εντονότερων θαλάσσιων συνθηκών οι οποίες θα προκαλούσαν καταστροφή της συσκευής, υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα το οποίο αποσύρει της μεταλλικές επιφάνειες σε ασφαλή θέση στη στεριά μέχρι να μπορέσει να συνεχιστεί αργότερα η απροβλημάτιστη λειτουργία του. Το SDE έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε οκτώ

μονάδες συνολικά. Ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί στο Ισραήλ, και παρήγαγε 40 kW/h για σχεδόν ένα χρόνο.

Οικονομία του SDE

Το κόστος κατασκευής ενός συστήματος SDE για τη παραγωγή 1MW είναι 519.898 ευρώ και αποτελεί την οικονομικότερη επιλογή της αγοράς. Σε αντίθεση με το κόστος ενός εργοστασίου λιγνίτη που είναι 1.192.843 ευρώ, ενός φυσικού αερίου που είναι 715.706 ευρώ, μιας μονάδας με φωτοβολταϊκά που είναι 1.192.843 ευρώ ή μιας μονάδας με ανεμογεννήτριες που είναι 2.385.687 ευρώ. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ένα σύστημα SDE είναι 0,015 ευρώ/Kwh, από ένα εργοστάσιο λιγνίτη 0,023 ευρώ/Kwh, από μια μονάδα με φωτοβολταϊκά 0,095 ευρώ/Kwh, από μια μονάδα με φυσικό αέριο 0,023 ευρώ/Kwh, ενώ από μια μονάδα με ανεμογεννήτριες 0,028 ευρώ/Kwh.

Η συσκευή εκτιμάται ότι θα λειτουργεί περίπου το 75% τον χρόνο και η έξοδός του ότι θα είναι περίπου στο 90%. Όπως έχει συμφωνηθεί με τις εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η τιμή πώλησης 1kW/h είναι 0,0417 ευρώ, ενώ τα προσδοκώμενα έσοδα από μια εγκατάσταση των 10MW αναμένεται να είναι 2,4 εκατομμύρια ευρώ τον χρόνο.

Το υπουργείο βιομηχανίας του Ισραήλ έχει ήδη δώσει άδεια για εγκατάσταση μιας μονάδας SDE 50MW η οποία θα λειτουργήσει για 20 χρόνια. [23]

4. Τεχνολογίες Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας Παράκτιας Ζώνης

4.1. Τεχνολογίες Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)

4.1.1. Mighty Whale

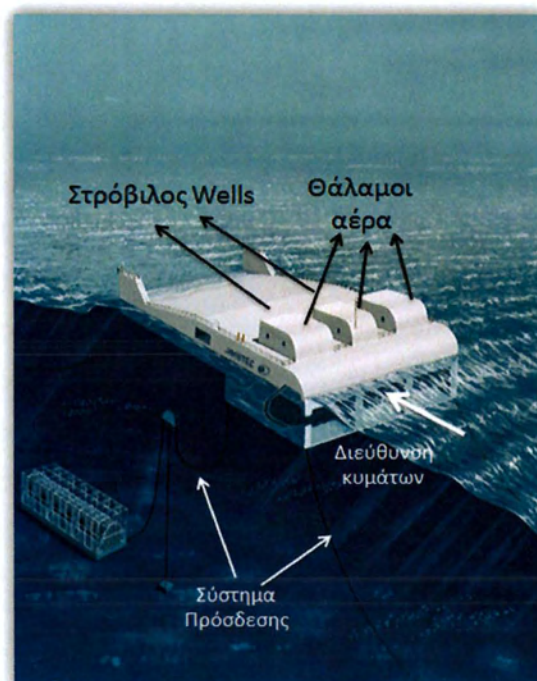
Τον Ιούλιο του 1998 το κέντρο θαλάσσιων επιστημών και τεχνολογίας της Ιαπωνίας λανσάρισε το Mighty Whale, τον μεγαλύτερο παγκοσμίως μετατροπέα κυματικής ενέργειας για παράκτια χρήση. Η εγκατάσταση μετατρέπει την ενέργεια των κυμάτων του Ειρηνικού Ωκεανού σε μηχανική και έπειτα σε ηλεκτρική ενέργεια.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

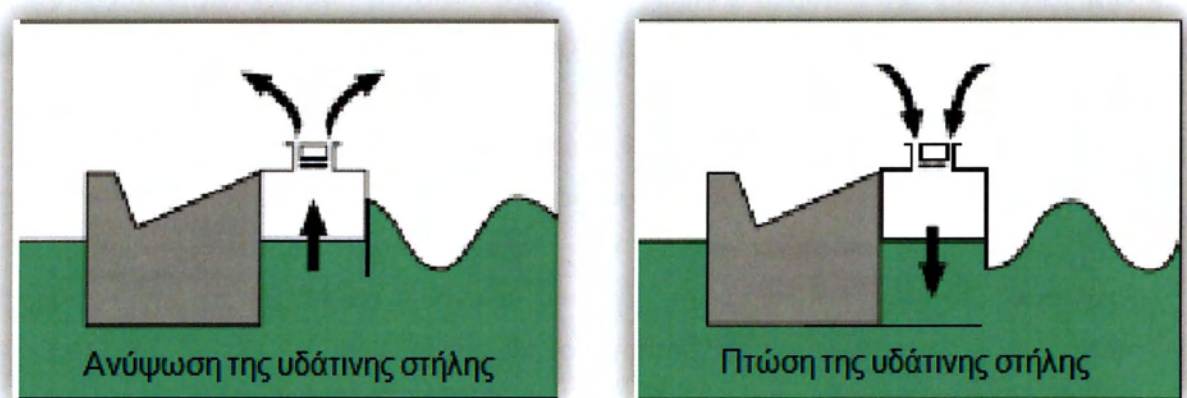
Ο μετατροπέας έχει ως αρχή λειτουργίας τη τεχνολογία της παλλόμενης υδάτινης στήλης (Π.Υ.Σ.). Οι διαστάσεις του είναι 50m μήκος, 30m πλάτος, 12m ύψος και 8m βύθισμα. Αποτελείται από τρεις θαλάμους αέρα μέσα στους οποίους διαμορφώνεται η υδάτινη στήλη. Η κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων έχει ως αποτέλεσμα τη ταλάντωση της υδάτινης στήλης και κατ'επέκταση την κίνηση του αέρα που υπάρχει πάνω από αυτή. Ο αέρας με τη σειρά του διέρχεται εντός ενός παλινδρομικού αεροστροβίλου δύο σταδίων (στρόβιλος Wells) ο οποίος κινεί επαγωγική γεννήτρια και παράγεται εναλλασσόμενη τάση 200 V. Συνολικά είναι εγκατεστημένοι τρεις αεροστρόβιλοι Wells. Ένας για κάθε θάλαμο. Ο ένας παράγει ισχύ 50 kW και οι άλλοι δύο 30 kW ο καθένας με τη συνολική ονομαστική ισχύ να διαμορφώνεται στα 110 kW.

Η συσκευή είναι τοποθετημένη 1,5 km από τον κόλπο Gokasho Bay και έχει προσδεθεί στον πυθμένα της θάλασσας βάθους 40m. Το σύστημα πρόσδεσης είναι κατασκευασμένο έτσι ώστε να είναι ανθεκτικό ακόμη και σε τυφώνες. Ο έλεγχος της λειτουργίας του Mighty Whale μπορεί να γίνει είτε από το σύστημα ελέγχου που βρίσκεται στην ακτή είτε από αυτό που είναι εγκατεστημένο πάνω στη συσκευή.

Μια προτεινόμενη εφαρμογή της τεχνολογίας θα ήταν η παροχή ηλεκτρισμού κοντά σε ιχθυοτροφία και εγκαταστάσεις αφαλάτωσης. [8],[24],[25]



Εικόνα 4.1 : Μετατροπέας Mighty Whale



Εικόνα 4.2 : παραστατική λειτουργία του Mighty Whale [25]

4.2. Τεχνολογίες Κατακόρυφης Ταλάντωσης

4.2.1. Lilypad Twin Membrane

Το Lilypad είναι ένας μετατροπέας κατακόρυφης ταλάντωσης της εταιρείας Energy Island. Η τεχνολογία του μετατροπέα βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο.

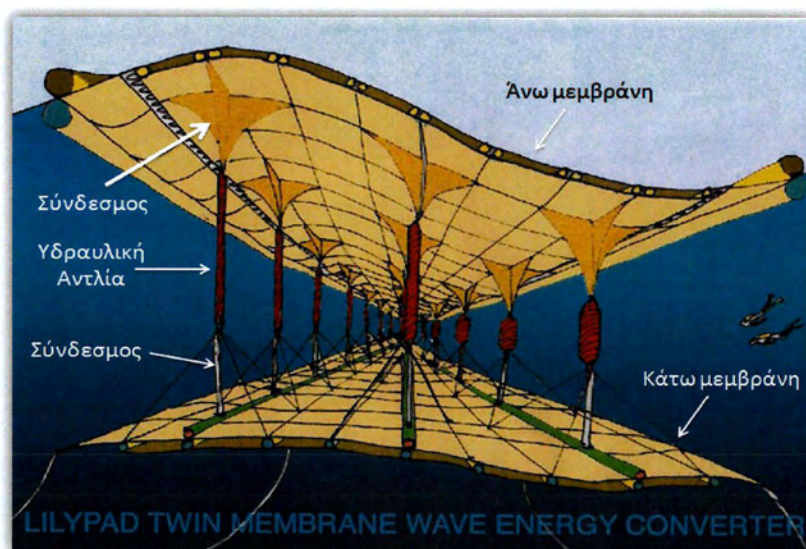
Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Lilypad αποτελείται από δυο ελαστικές μεμβράνες. Η μια είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ η άλλη υποθαλάσσια. Οι δυο μεμβράνες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και ανάμεσα στους συνδέσμους έχουν τοποθετηθεί υδραυλικές αντλίες. Η μεμβράνη που βρίσκεται στην επιφάνεια ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων. Όταν διέρχεται ένα κύμα τότε αυτή “τραβά” τον σύνδεσμο που έχει με την υποθαλάσσια μεμβράνη, ενώ η υποθαλάσσια μεμβράνη αντιστέκεται σε αυτή τη κίνηση λόγω της βαρύτητας. Το αποτέλεσμα της κίνησης του συνδέσμου είναι η λειτουργία της υδραυλικής αντλίας που παρεμβάλλεται στα ενδιάμεσα. Η υδραυλική πίεση που δημιουργείται από την αντλία μπορεί να δώσει κίνηση σε έναν υδροστρόβιλο Pelton και να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Όταν απέλθει το κύμα τότε οι υπάρχουσες βαλβίδες στις αντλίες ανοίγουν και επαναφέρουν στην αρχική κατάσταση τις αντλίες ώστε να συνεχιστεί ομοίως ο κύκλος. Η απόδοση από τον υδροστρόβιλο Pelton εκτιμάται περίπου στο 65%.

Επίσης στην μεμβράνη που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι τοποθετημένες σφαιρικές διατάξεις οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους. Καθώς διέρχονται

τα κύματα η κίνηση των σφαιρών αντιδρά στη μεταξύ τους σύνδεση και από αυτή την αντιδρώσα δύναμη παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Το Lilypad εκτός της χρήσης του ως μετατροπέας της κυματικής ενέργειας, λόγω της γεωμετρίας του μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως κυματοθραύστης μειώνοντας έτσι το ύψος των κυμάτων και προστατεύοντας τις παραθαλάσσιες εγκαταστάσεις. [26]



Εικόνα 4.2 : σχηματική αναπαράσταση του Lilypad

4.2.2. Combined Energy System (CES)

Το CES είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος βασίζεται στη τεχνολογία της κατακόρυφης ταλάντωσης και έχει αναπτυχθεί από την Αμερικάνικη εταιρεία Ocean Motion International (OMI). Η συσκευή είναι ικανή να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, πόσιμο νερό και αέριο υδρογόνο με πολύ χαμηλό κόστος χωρίς παράλληλα να προκαλεί επιβλαβείς εκπομπές στο περιβάλλον.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το CES αποτελείται από δύο πλατφόρμες. Η μια που είναι τοποθετημένη στον βυθό της θάλασσας και χρησιμοποιείται ως βάση και η άλλη που είναι υπερυψωμένη στην επιφάνεια. Στο κάτω μέρος της πλατφόρμας της επιφανείας έχουν προσδεθεί πλωτήρες. Κάθε πλωτήρας συνδέεται με μια αντλία. Το σύνολο των αντλιών είναι 20 – 35 και έχουν διαμέτρους από 0,300 – 0,914 (m). Όταν ένα κύμα φτάσει σε κάποιο από τα πλωτά

σώματα τότε η παλινδρομική του κίνηση θέτει σε λειτουργία την αντλία και αυτή συμπιέζει μια ποσότητα νερού. Όλες οι αντλίες είναι διασυνδεδεμένες μεταξύ τους και η ποσότητα νερού που συμπιέζουν οδηγείται σε έναν υδροστρόβιλο μέσω του οποίου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης με της διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης παράγεται πόσιμο νερό, ενώ μέσω ηλεκτρόλυσης αέριο υδρογόνο. [28]



Εικόνα 4.3 : Εγκατάσταση CES

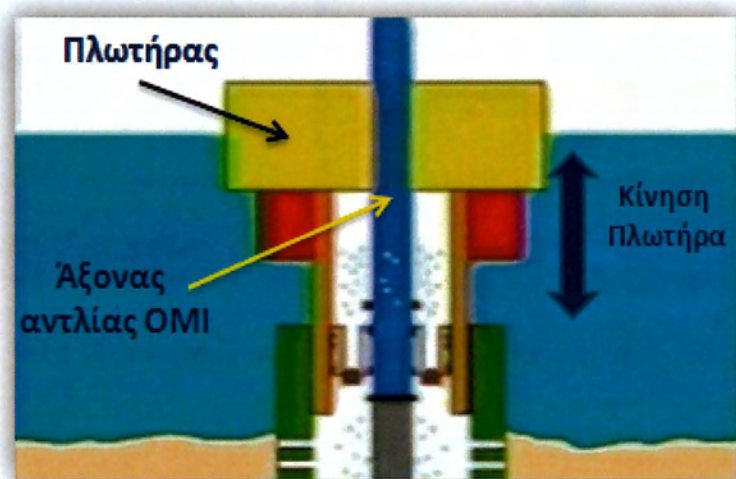
Παρακάτω θα αναλύουμε τα επιμέρους στοιχεία του CES :

Αντλία Κυμάτων OMI

Η τεχνική περιγραφή της αντλίας OMI είναι "συσκευή μετατροπής κυματικής ενέργειας με εκτόπισμα μάζας", είναι πατενταρισμένη από την εταιρεία OMI (με αριθμό πατέντας 5,411,377). Η αντλία OMI είναι η καρδιά του συστήματος CES και αποτελείται από ελάχιστα κινητά τμήματα εξασφαλίζοντας έτσι μικρό κόστος συντήρησης και υψηλή αξιοπιστία. Επίσης δε χρησιμοποιεί εξωτερικές πηγές ενέργειας για τη λειτουργία της μειώνοντας έτσι τις επιβλαβείς εκπομπές.

Αυτή η επαναστατική αντλία έχει σχεδιαστεί ώστε να αντλεί μεγάλες ποσότητες νερού και να το συμπιέζει σε πολύ υψηλές πιέσεις, λαμβάνοντας ενέργεια για τη λειτουργία της από τη κίνηση του πλωτήρα με τον οποίο είναι συνδεδεμένη. Το κέλυφος της αντλίας είναι συνδεδεμένο με τον πλωτήρα και τα δύο άκρα του άξονά της με κάθε μια από τις δύο πλατφόρμες. Με αυτόν τον τρόπο, όταν διέρχεται ένα κύμα και ταλαντώνεται ο πλωτήρας στην επιφάνεια της θάλασσας η αντλία αναρροφά ή συμπιέζει ανάλογα με την κίνησή

του. Το μέγεθος της αντλίας αλλάζει από περιοχή σε περιοχή ώστε να υπάρχει βέλτιστη λειτουργία του συστήματος ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή. [28]



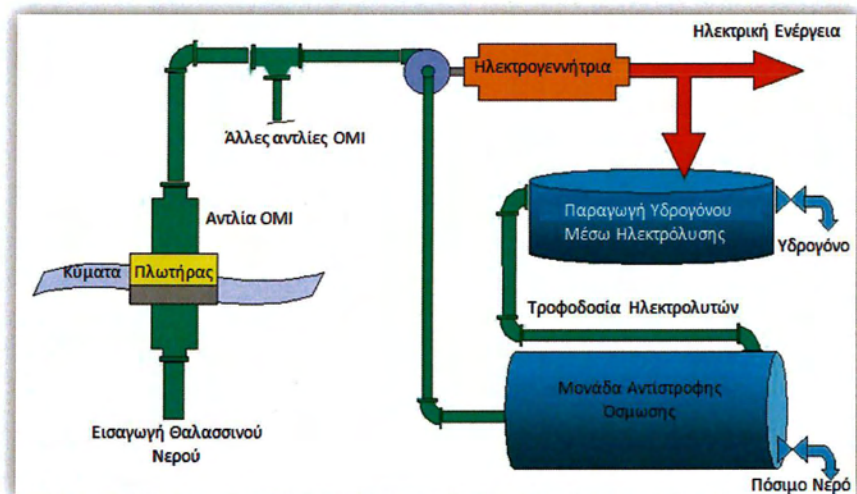
Εικόνα 4.4 : Αντλία OMI

Αφαλάτωση στη συσκευή CES

Το σύστημα CES παράγει μέσω της διαδικασίας της αντίστροφης όσμωσης πόσιμο νερό. Θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης μέσω υδραντλιών φιλτράρεται. Το πόσιμο νερό που παράγεται από το φιλτράρισμα μεταβιβάζεται στη στεριά μέσω σωληνώσεων. Συνήθως οι συσκευές αφαλάτωσης είναι πολύ ενεργοβόρες και υψηλού κόστους. Ωστόσο λόγω της χρήσης των αντλιών υψηλής πίεσης οι οποίες τροφοδοτούνται από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην ίδια την εγκατάσταση το κόστος αυτής της διαδικασίας μειώνεται σημαντικά. [28]

Παραγωγή Υδρογόνου στη συσκευή CES

Το CES διαθέτει εγκατάσταση για την παραγωγή υδρογόνου με χαμηλό κόστος. Το υδρογόνο παράγεται με ηλεκτρόλυση. Το συνολικό κόστος παραγωγής του μειώνεται λόγω της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από το CES. Η ποσότητα παραγωγής υδρογόνου αυξάνεται ιδιαίτερα τις περιόδους όπου η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια στη στεριά είναι μειωμένη. Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει επιδείξει η Αμερικάνικη κυβέρνηση για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της μονάδας CES και για αυτό χρηματοδοτεί την προσπάθεια κατασκευής ενός πρωτοτύπου. [28]



Εικόνα 4.5 : Σχηματική αναπαράσταση μονάδας CES

Απόδοση του CES

Παρακάτω έχει υπολογιστεί η εκτιμώμενη απόδοση μιας εγκατάστασης CES καθώς και οι ποσότητες από τα προϊόντα τα οποία μπορεί να παράγει. Για μια πειραματική διάταξη τεσσάρων αντλιών, όπου η διάμετρος της κάθε αντλίας είναι 0,66m και κυματικής κοιλότητας με ύψος 2,71m η έξοδος της αντλίας είναι 11.000.000 γαλόνια / μέρα και η απόδοση του συστήματος αντίστροφης όσμωσης βρέθηκε 40%. Ακολουθούν οι ποσότητες των προϊόντων που μπορούν παραχθούν ανά ημέρα [28] :

- ♦ Νερό : 4.400.000 γαλόνια / ημέρα (μετρήσεις συστήματος με 4 αντλίες)
- ♦ Ηλεκτρική ισχύς : έξοδος 5 – 50 MW (μετρήσεις σε σύστημα πλήρους κλίμακας)
- ♦ Υδρογόνο : 573 γαλόνια υγρό υδρογόνο / ώρα (μετρήσεις σε σύστημα πλήρους κλίμακας)

4.2.3.WET EnGen

Το WET EnGen είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την Καναδική εταιρεία Wave Energy Technologies Inc το 2004. Το WET EnGen εντάσσεται στις τεχνολογίες κατακόρυφης ταλάντωσης και οι αρχικοί εφευρέτες του είναι ο Alan Volwes και ο Brian Kurczaba. Μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια αλλά και πόσιμο νερό.

Το WET EnGen έχει εμπορευματοποιηθεί και το σημαντικότερο χαρακτηριστικό του είναι η υψηλή ενεργειακή του απόδοση. Επίσης έχει σημαντικά χαμηλότερο κόστος

οιργάνωσης και συντήρησης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

ησιμοποιούμενη Τεχνολογία

WET EnGen αποτελείται από μια σταθερή βάση που είναι τοποθετημένη στον βυθό της θάλασσας. Πάνω στη βάση είναι προσαρμοσμένος ένας άξονας από το ένα άκρο, με κλίση 45° ο οποίος μπορεί να περιστρέφεται πλήρως προς όλες τις κατευθύνσεις ανάλογα με τη φορά των κυμάτων. Το άλλο του άκρο είναι ελεύθερο και περιστρέφεται στην επιφάνεια της θάλασσας. Στην επιφάνεια της θάλασσας είναι τοποθετημένος ένας ειδικά διαμορφωμένος πλωτήρας ο οποίος ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων. Ο πλωτήρας είναι επίσης προσαρμοσμένος στον άξονα τον οποίο χρησιμοποιεί σαν οδηγό κατά την ταλάντωσή του λόγω των διερχόμενων κυμάτων. Η μηχανική ενέργεια που περικλείεται στα κύματα μετατρέπεται σε μηχανική μέσω μιας τροχαλίας που είναι προσαρμοσμένη στον πλωτήρα. Η μηχανική ενέργεια της τροχαλίας μεταβιβάζεται σε έναν άξονα και αυτός με τη σειρά του θέτει σε λειτουργία έναν στρόβιλο που παράγει ηλεκτρική ενέργεια ή μια αντλία πίεσης νερού για αφαλάτωση. Η συσκευή του πλωτήρα είναι τέτοια ώστε να μπορεί να γίνεται εκμετάλλευση τόσο της δυναμικής όσο και της δυναμικής ενέργειας των κυμάτων. Το WET EnGen παράγει ηλεκτρική ενέργεια και κατά την άνοδο και κατά την κάθοδο του πλωτήρα. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση της συσκευής. [29]



Εικόνα 4.6 : Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του WET EnGen [29]

Οικονομικά Οφέλη

Το WET EnGen λόγω της απλής σχεδίασής του και των λίγων κινητών μερών του έχει αυξημένη αξιοπιστία και μειωμένο κόστος συντήρησης. Επίσης το κόστος παραγωγής της ενέργειας είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με αυτό άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το κόστος της παραγόμενης ενέργειας ενός μετατροπέα WET EnGen είναι 0,04 euro/kWh περίπου, ενώ το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού κυμαίνεται στα 1,21 euro/1000L.



Εικόνα 4.7 : Δοκιμή WET EnGen σε δεξαμενή παραγωγής κυμάτων

4.3. Τεχνολογίες Αρθρώσεων

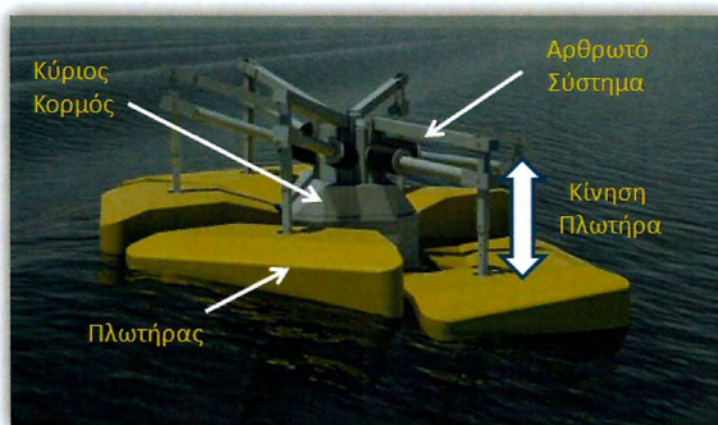
4.3.1.WEM

Το WEM (Wave Energy Module) είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την Ιταλική εταιρεία Wempower και η λειτουργία του βασίζεται σε ένα σύστημα αρθρώσεων. Με το WEM είναι επίσης δυνατή η παραγωγή πόσιμου νερού με όσμωση. Η χρήση του ενδείκνυται για μεσαία θαλάσσια βάθη.

Για τη κατασκευή του χρησιμοποιούνται πλήρως ανακυκλώσιμα υλικά και αποτελεί μια φιλική προς το περιβάλλον συσκευή. Έχει υψηλή απόδοση περίπου 60% - 70% κάτι που το καθιστά ιδιαίτερα ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλες παρόμοιες τεχνολογίες.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το WEM αποτελείται από έξι πλωτήρες τοποθετημένους κυκλικά. Κάθε πλωτήρας ζυγίζει περίπου 1000 κιλά και είναι γεμάτος μέχρι τη μέση με νερό. Σε κάθε πλωτήρα έχει τοποθετηθεί ένα μεταλλικό σύστημα αρθρώσεων. Το ένα άκρο του είναι προσαρμοσμένο στο πάνω μέρος του πλωτήρα ενώ το άλλο άκρο καταλήγει στον κύριο κορμό της κατασκευής. Ο κύριος κορμός ζυγίζει 1400 κιλά, έχει διάμετρο 6m και είναι προσδεμένος στον πυθμένα της θάλασσας. Εντός του κορμού υπάρχει μια ηλεκτρογεννήτρια ονομαστικής ισχύος 7 kW. Καθώς διέρχονται τα κύματα και οι πλωτήρες ταλαντώνονται η μηχανική ενέργεια λόγω της κίνησής τους μεταφέρεται μέσω του αρθρωτού συστήματος σε μια συσκευή που βρίσκεται επίσης στο κέντρο του κύριου κορμού του WEM. Η συσκευή που συγκεντρώνει η συνολική μηχανική ενέργεια των έξι πλωτήρων, μέσω παλμών ενεργοποιεί την ηλεκτρογεννήτρια και αυτή με τη σειρά της παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου μεταφέρεται κατευθείαν στο κεντρικό δίκτυο. [29]

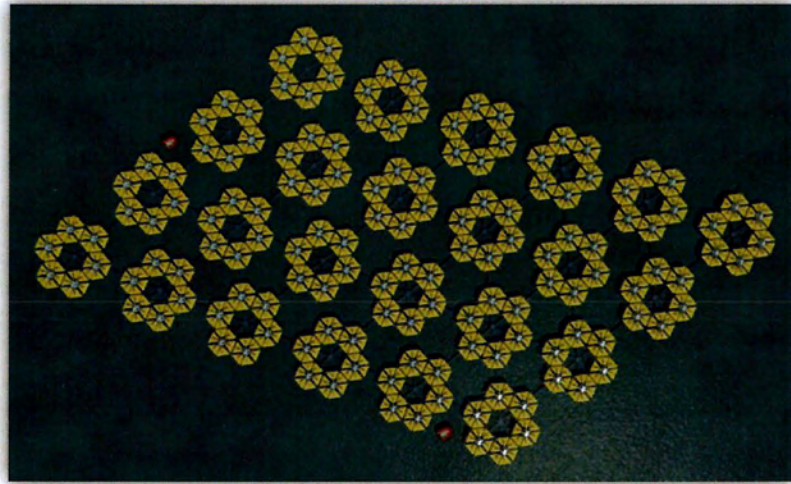


Εικόνα 4.8 : Σχηματική περιγραφή της λειτουργίας του συστήματος WEM [29]

Απόδοση και αξιοπιστία του WEM

Το WEM είναι ένα από τα πιο αποδοτικά συστήματα τεχνολογίας αρθρώσεων. Η διάταξή του το βοηθά να προσαρμόζεται σε διάφορα κυματικά κλίματα και να εκμεταλλεύεται τη φορά των κυμάτων, όποια και αν είναι αυτή. Εκτιμάται ότι για ύψος κύματος ενός μέτρου και περίοδο 9 κύματα ανά λεπτό (συχνότητα 0,15 Hz) κάθε μονάδα WEM μπορεί να παράγει 4 kW από τα 7 kW που είναι η ονομαστική ισχύς. Αυτό αντιστοιχεί σε 35.040 kWh ενέργειας για λειτουργία του συστήματος ένα χρόνο για 24 ώρες. Ωστόσο σε περιοχές όπου η κυματική δραστηριότητα είναι εντονότερη είναι δυνατή η παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας ενέργειας. [29]

Ανάλογα με τη ζήτηση που υπάρχει σε ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να τοποθετηθούν πολλαπλά WEM ώστε να αυξηθεί η παραγωγή. Η τοποθέτησή τους όμως πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η κίνηση του ενός να μην επηρεάζει το άλλο.



Εικόνα 4.9 : εγκατάσταση πολλών WEM συνολικής ισχύος 1 MW

Το WEM μπορεί να τοποθετηθεί παράκτια αλλά και στην ανοιχτή θάλασσα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η τωρινή τοποθεσία δοκιμής του που είναι 8.000km έξω από την Ιταλική ακτή. Αυτό το καθιστά ικανό να μπορεί να τοποθετηθεί σε νησιά και σε απομακρυσμένες περιοχές, ώστε να καλύψει τις ενεργειακές τους ανάγκες.

Χάρη στην απλή κατασκευή του έχει αυξημένη αξιοπιστία και είναι ανθεκτικό σε καταιγίδες και ακραία κυματικά κλίματα. Ο χρόνος ζωής του εκτιμάται ότι είναι 20 χρόνια.

4.4. Τεχνολογίες Οριζόντιας Κίνησης

4.4.1.Oyster

Το Oyster είναι ένας από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους μετατροπείς κυματικής ενέργειας ο οποίος εκμεταλλεύεται την οριζόντια κίνηση των κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

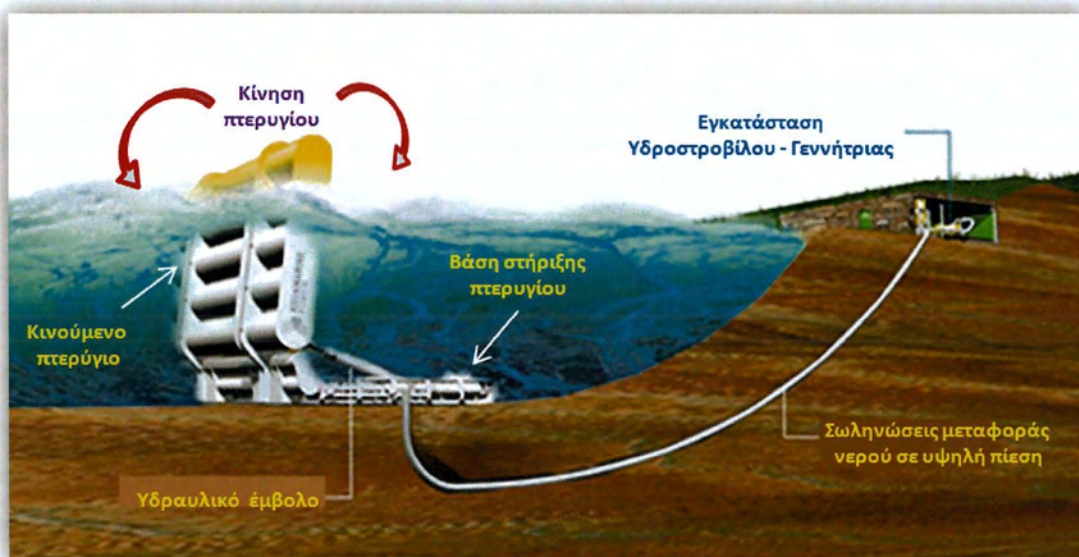
Η Σκωτσέζικη εταιρεία Aquamarine Power είναι υπεύθυνη για την κατασκευή του. Αρχικά τις έρευνες για τη κατασκευή του πρωτοτύπου έκανε το Queen's University Belfast με κύριο εκπρόσωπο τον καθηγητή Trevor Whittaker. Η Aquamarine Power συνεργάστηκε επίσης με την Renewable Technologies Ventures Ltd για την ανάπτυξη του Oyster. [30]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Oyster εκμεταλλεύεται την ενέργεια των κυμάτων που βρίσκονται κοντά στην ακτή. Σχεδιάστηκε για να λειτουργεί αποτελεσματικά σε βάθη πυθμένα από 10m – 15m. Το Oyster είναι μια σχετικά απλή κατασκευή. Αποτελείται από μια βάση (Power Connector Frame – PCF) η οποία ζυγίζει 36 τόνους και τοποθετείται στον πυθμένα της θάλασσας. Οι στηρίξεις της είναι κατασκευασμένες από τσιμέντο και είναι τοποθετημένες 14m κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Πάνω από τη βάση έχει προσαρμοστεί μια μορφή πτερυγίου το οποίο ζυγίζει 200 τόνους και οι διαστάσεις του είναι 18m πλάτος, 12m ύψος 4m πάχος. Το πτερύγιο διαθέτει κυλίνδρους που είναι τοποθετημένοι παράλληλα μεταξύ τους ο ένας πάνω από τον άλλον. Για την αρχική βύθισή του στον πυθμένα, ώστε να μπορέσει να στηριχθεί στη βάση, οι δεξαμενές που βρίσκονται εντός των κυλίνδρων γεμίζονται με 120 τόνους θαλασσινό νερό. Το πτερύγιο βρίσκεται σχεδόν ολόκληρο υποθαλάσσια, μόνο 2m απέχουν πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Καθώς τα κύματα διέρχονται, το πτερύγιο ταλαντώνεται εμπρός – πίσω και αυτή η κίνησή του θέτει σε λειτουργία δύο υδραυλικά έμβολα. Τα έμβολα αντλούν μεγάλες ποσότητες νερού σε υψηλή πίεση και μέσω τριών υποθαλάσσιων σωληνώσεων το κατευθύνουν σε έναν στρόβιλο Pelton που βρίσκεται στην ακτή. Ο υδροστρόβιλος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρογεννήτρια μέσω της οποίας τελικά παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αιχμής της κάθε μονάδας Oyster είναι μεταξύ 300 kW έως 600kW ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της. Μια εγκατάσταση εμπορικής κλίμακας αποτελούμενη από δέκα μονάδες Oyster εγκατεστημένες στη σειρά μπορεί να παράγει μέχρι και 6 MW ηλεκτρικής ενέργειας. [30]



Εικόνα 4.10 : σχηματική περιγραφή της λειτουργίας του Oyster [31]

Αξιοπιστία

Το Oyster είναι μια στιβαρή και αξιόπιστη κατασκευή. Κάθε του εξάρτημα αποτελείται από υλικά τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες παρόμοιες εφαρμογές οι οποίες έχουν ήδη επιβεβαιώσει την αξιοπιστία τους.

Οι προδιαγραφές του συστήματος είναι τέτοιες ώστε να καταφέρει να λειτουργήσει περίπου 8 εκατομμύρια φορές ετησίως (συμπίεση νερού / επιστροφή νερού στη θάλασσα).

Απόδοση

Υδροδυναμική Απόδοση

Η υδροδυναμική απόδοση του Oyster έχει υπολογιστεί με τη χρήση υπολογιστικών, αλλά και πειραματικών μοντέλων. Τα αποτελέσματα και των δύο μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα για την απόδοση του συστήματος.

Τα πειράματα διεξήχθησαν με τη χρήση δύο μοντέλων. Ενός κλίμακας 1:40 και ενός 1:20. Όλες οι δοκιμές έγιναν στο Queens University Belfast σε δεξαμενή παραγωγής τεχνητών κυμάτων.

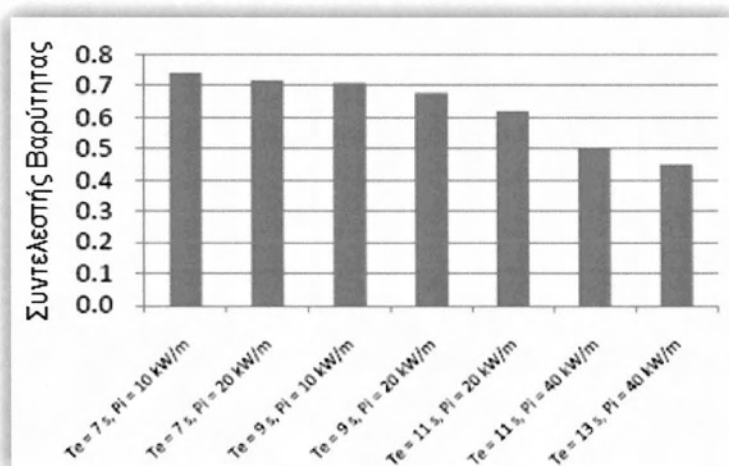
Το αριθμητικό μοντέλο αναπτύχθηκε με βάση την υδροδυναμική εξίσωση δεύτερης τάξης, ενώ έγιναν επεμβάσεις σε αυτό με βάση τα στοιχεία που βρέθηκαν από το πειραματικό μοντέλο, ώστε τα αποτελέσματα που δίνει να προσεγγίζουν περισσότερο τη πραγματική λειτουργία του συστήματος. Ωστόσο, για χάρη ευκολίας στην απλότητα του μοντέλου και στη ταχύτητα των υπολογισμών δεν έχουν ληφθεί υπόψη αρκετές παράμετροι που θα έπρεπε να έχει ένα υδροδυναμικό μοντέλο αυτού του τύπου. Γι' αυτό τα εξαγόμενα αποτελέσματα έχουν απόκλιση της τάξης του 10% από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πειραματικό μοντέλο.

Η μοντελοποίηση του Oyster έδειξε ότι η λειτουργία του συνδέεται άμεσα με τη φυσική συχνότητα των διερχόμενων κυμάτων, ενώ με συντονισμό της κίνησης της συσκευής με τον παραπάνω παράγοντα είναι εφικτή η επίτευξη της μέγιστης απόδοσής του. Παρόλα αυτά σε αβαθή νερά το πλεονέκτημα του συντονισμού δεν είναι εύκολο να χρησιμοποιηθεί λόγω των απωλειών ιξωδών δυνάμεων από τις μεγάλες κινήσεις της συσκευής. Για την εξισορρόπηση αυτών των απωλειών και για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση της συχνότητας κίνησης του πτερυγίου με τη συχνότητα των διερχόμενων κυμάτων, το Oyster ρυθμίζεται έτσι ώστε να είναι δυσκολότερη η περιστροφή του

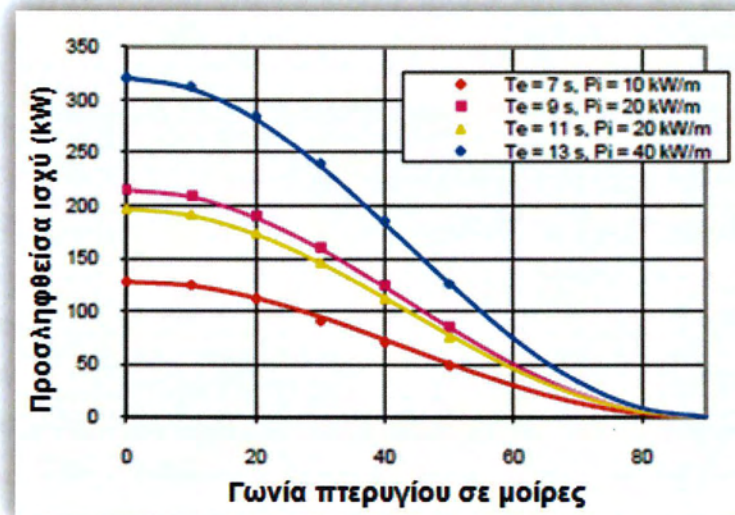
πτερυγίου του. Με αυτό τον τρόπο γίνεται ευκολότερος ο συντονισμός με τη φυσική συχνότητα κίνησης των κυμάτων.

Οι κυματικές δυνάμεις που ασκούνται στο Oyster σχετίζονται με την αλλαγή της οριζόντιας επιτάχυνσης των σωματιδίων του νερού η οποία αυξάνεται καθώς το βάθος της θάλασσας μειώνεται. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι για ένα κύμα περιόδου 10sec και βάθος πυθμένα 12m έχουμε αύξηση των ασκούμενων δυνάμεων από τα κύματα κατά 50% σε σύγκριση με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται σε μεγαλύτερα βάθη. Σύμφωνα με τα πειράματα που έγιναν, αλλά και από το αριθμητικό μοντέλο, η μέγιστη αλληλεπίδραση με την οριζόντια επιτάχυνση των σωματιδίων του νερού και κατ επέκταση και η ανάπτυξη της μέγιστης δύναμης των κυμάτων προκαλείται όταν το πτερύγιο του Oyster βρίσκεται παράλληλα με τον πυθμένα της θάλασσας και τείνει να μεγαλώσει η γωνία του με τη βάση. Για να γίνει σύλληψη της βέλτιστης δυνατής ποσότητας ενέργειας από τα κύματα το πτερύγιο σχεδιάζεται όσο το δυνατόν πλατύτερο. Ωστόσο το μέγιστο πλάτος του πτερυγίου περιορίζεται από την ανισοκατανομή του προφίλ της δύναμης των κυμάτων που ασκούνται πάνω του. Μεγαλύτερο πλάτος πτερυγίου θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης.

Η μέση απόδοση του Oyster σε μια τυπική ακτή του Β. Ατλαντικού υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την απόδοσή του σε διάφορα σημεία της θάλασσας και η μέση τιμή αυτής πολλαπλασιάστηκε με έναν συντελεστή βαρύτητας. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων για όλο τον χρόνο είναι 19 kW/m. Αυτό αντιστοιχεί σε ισχύ εξόδου στους κυλίνδρους ίση με 200 kW. Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.11) φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή βαρύτητας ο οποίος έχει οριστεί σαν ποσοστό του πλάτους του πτερυγίου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο συντελεστής βαρύτητας γίνεται μεγαλύτερος για μικρά βάθη πυθμένα, μικρές περιόδους και μικρά πλάτη κύματος. [30]



Εικόνα 4.11 : συντελεστής βαρύτητας – πλάτος πτερυγίου για διάφορα βάθη πυθμένα



Εικόνα 4.12 : μεταβολή της ενέργειας που προσλαμβάνεται από τα κύματα ανάλογα με τη γωνία του πτερυγίου

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι όταν το πτερύγιο είναι οριζόντιο με τον πυθμένα της θάλασσας (0°) τότε η ενέργεια που προσλαμβάνεται είναι περισσότερη. Αντίθετα, όταν είναι σχεδόν κάθετα (80°) η ποσότητα της προσληφθείσας ενέργειας γίνεται ελάχιστη.

Οικονομικά

Τη χρηματοδότηση για την ανάπτυξη του Oyster ανέλαβαν διάφοροι φορείς. Αντιπροσωπευτικά η Scottish Enterprise επένδυσε 6,3 εκατομμύρια δολάρια και η Sigma Capital Group plc 1,5 εκατομμύρια δολάρια. Η συνολική χρηματοδότηση του προγράμματος ήταν 11 εκατομμύρια δολάρια. Τον Ιούνιο του 2009 η Aquamarine Power υπέγραψε συμφωνία με την Furgo Seacore ύψους 2,5 εκατομμύρια δολαρίων για την εγκατάσταση του Oyster στο Orkney σε βάθος 12m. [32]

Πλεονεκτήματα χρήσης του Oyster

Τα βασικά πλεονεκτήματα χρήσης του Oyster είναι τα εξής [30],[32] :

- Το Oyster έχει ελάχιστα κινούμενα μέρη και αυτά είναι υποθαλάσσια. Έτσι αυξάνεται η αξιοπιστία του σε ακραίες κυματικές συνθήκες μιας και μπορεί να κινείται κάτω από τα μεγάλα θαλάσσια κύματα ανεπηρέαστο.

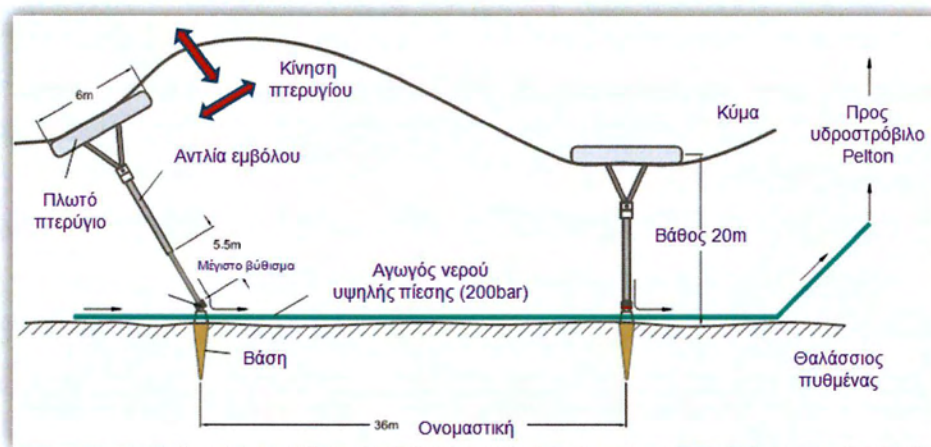
- ✦ Ο εξοπλισμός που παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια είναι εγκατεστημένος κοντά στην ακτή και έτσι είναι εφικτή η άμεση πρόσβασή του και συντήρησή του. Με τη χρήση του Oyster μπορεί να αποφευχθεί η παραγωγή πάνω από 500 τόνους διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από τη παραγωγή ενέργειας με τη χρήση ορυκτών καυσίμων.
- ✦ Η Aquamarine υποστηρίζει ότι μια φάρμα από 20 μονάδες μπορεί να καλύψει τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας 9.000 κατοικιών.
- ✦ Η κατασκευή και η εγκατάστασή του μπορεί να προσφέρει περίπου 12.500 θέσεις εργασίας και να αποφέρει έσοδα στην Αγγλική οικονομία της τάξεως των 2,5 δισεκατομμυρίων δολαρίων.
- ✦ Τα κυματικά κλίματα κοντά στις ακτές είναι πιο σταθερά και προβλέψιμα από αυτά στην ανοιχτή θάλασσα.
- ✦ Το Oyster έχει σχεδιαστεί ώστε να παράγεται ασταμάτητα ηλεκτρική ενέργεια ανεξαρτήτως των κυματικών συνθηκών που επικρατούν.

4.4.2.SurfPower

Το SurfPower είναι ένας μετατροπέας της κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει αναπτυχθεί από την Seawood Design Inc (SDI) και τοποθετείται παράκτια. Ανήκει στη κατηγορία των σημειακών μετατροπέων και η κατασκευή του είναι ιδιαίτερα απλή, αλλά ταυτόχρονα αρκετά αποδοτική.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το SurfPower αποτελείται από ένα πλατύ πλωτό πτερύγιο. Στο κάτω μέρος του πτερυγίου είναι τοποθετημένη μια αντλία νερού με έμβολο. Η άλλη άκρη της αντλίας προσδένεται στον πυθμένα της θάλασσας με μια ειδικά διαμορφωμένη βάση η οποία μπορεί να περιστρέφεται. Το πτερύγιο χάρη στη περιστρεφόμενη βάση μπορεί να προσανατολίζεται ανάλογα με τα διερχόμενα κύματα ώστε να βελτιστοποιείται η απόδοση του συστήματος. Καθώς διέρχονται τα κύματα, το πτερύγιο ακολουθεί τη κίνησή τους. Με τη ταλάντωση που κάνει το πτερύγιο τίθεται σε λειτουργία η αντλία που βρίσκεται στερεωμένη στο κάτω μέρος του. Το νερό που αναρροφούν όλες οι αντλίες συγκεντρώνεται και μέσω σωληνώσεων αποστέλλεται σε έναν υδροστρόβιλο Pelton με υψηλή πίεση. Ο υδροστρόβιλος με τη σειρά του παράγει ηλεκτρική ενέργεια. [33]

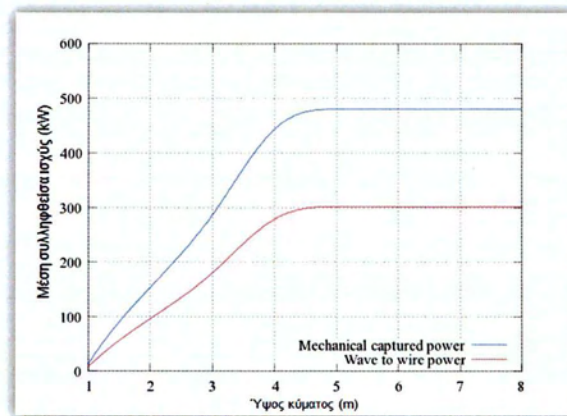


Εικόνα 4.13 : Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του SurfPower [34]

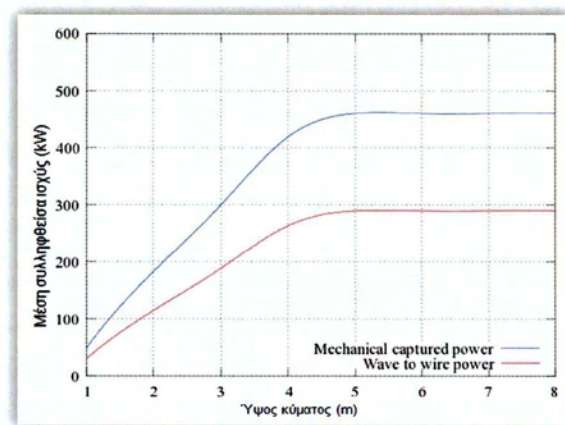
Η DSI ανέθεσε στην Dynamic Systems Analysis, Ltd (DSA) δύο σημαντικές δραστηριότητες. Η πρώτη αφορούσε την ανάπτυξη ενός μοντέλου εξομοίωσης σε υπολογιστή, της λειτουργίας του συστήματος SurfPower και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του, με τα αποτελέσματα ενός πειραματικού μοντέλου. Η δεύτερη αφορούσε την εύρεση διαφόρων μεθόδων βελτίωσης της απόδοσης του SurfPower.

Η DSI σε συνεργασία με την AXYS Technologies Inc (ATI) και την DSA κατάφερε να υπολογίσει την ετήσια παραγωγή κυματικής ενέργειας σε μια ακτή Δυτικά της νήσου Βανκούβερ χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου. Με αυτές τις στρατηγικές ελέγχου βρέθηκε η μέγιστη απόδοση του συστήματος για διάφορα ύψη κύματος ακόμη και σε δυσμενείς κυματικές συνθήκες. Στα διαγράμματα που φαίνονται στις εικόνες 49, 50, 51 παρουσιάζεται η μεταβολή της ενέργειας η οποία δεσμεύτηκε από το SurfPower ανάλογα με το ύψος κύματος και τη στρατηγική ελέγχου η οποία χρησιμοποιήθηκε. Στα διαγράμματα παρουσιάζεται επίσης και η μεταβολή της ενέργειας που θα τροφοδοτήσει το δίκτυο. Αυτή η καμπύλη βρίσκεται πιο χαμηλά από την καμπύλη τη κυματικής ενέργειας η οποία δεσμεύεται, λόγω των διαφόρων ενδιάμεσων απωλειών όπως αυτές στην αντλία στην απόδοση του στρόβιλου κ.λπ..

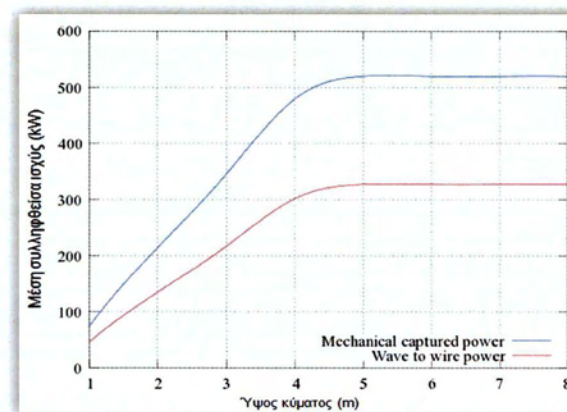
Με τη βοήθεια αυτών των καμπύλων και σε συνδυασμό με πραγματικά στοιχεία τα οποία προήλθαν από μια συσκευή που τοποθετήθηκε 2,3km έξω από τη νήσο Βανκούβερ υπολογίστηκε η στάθμη της ετήσια παραγόμενης ενέργειας. Η συνολική ενέργεια η οποία υπολογίστηκε είναι 368 MWh, 455 MWh, 552 MWh για κάθε μια στρατηγική ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε αντίστοιχα. Η μέση ενέργεια παράγεται συνήθως τη χειμερινή περίοδο και είναι περίπου 95 kW από μια τυπική εγκατάσταση αποτελούμενη από 50 συσκευές.



Εικόνα 4.14 : Μέση παραγόμενη ισχύ με τη 1^η στρατηγική ελέγχου [34]



Εικόνα 4.15 : Μέση παραγόμενη ισχύ με τη 2^η στρατηγική ελέγχου [34]



Εικόνα 4.16 : Μέση παραγόμενη ισχύ με τη 3^η στρατηγική ελέγχου [34]

Παρατηρούμε ότι ακολουθώντας τη 1^η στρατηγική ελέγχου η ενέργεια που λαμβάνεται είναι περισσότερη σε σχέση με τις άλλες δύο περιπτώσεις. Επίσης για κύματα μεγαλύτερα των 4m η ισχύς που προσλαμβάνεται σταθεροποιείται. Αυτό συμβαίνει λόγω

της ενεργοποίησης ενός συστήματος για περιορισμό της κίνησης του πτερυγίου ώστε να μην επέλθει η καταστροφή της συσκευής πιθανότατα εξαιτίας της ύπαρξης ακραίων κυματικών συνθηκών. [34]

Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Όλες οι δοκιμές έγιναν με κύματα τύπου Airy και περιόδου 9sec. Το ύψος κύματος κυμάνθηκε από 1m – 4m και το βάθος 20m.

Προσομοίωση – Σχεδίαση Φυσικού Μοντέλου

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε υπολογιστή χρησιμοποιήθηκαν για τη λεπτομερή σχεδίαση σε CAD και τη μετέπειτα κατασκευή του πρωτότυπου φυσικού μοντέλου. Στους παρακάτω πίνακες (εικόνα 5.1, 5.2) φαίνονται οι διαφορορές μεταξύ υπολογιστικού και φυσικού μοντέλου.

Τμήμα	Φυσικό μοντέλο – μάζα (kg)	Υπολ. μοντέλο– μάζα (kg)
Έμβολο / άξονας	3605	907
Κύλινδρος	4051	4082
Πτερύγιο	17168	17700

Εικόνα 5.1 : Τεχνικά στοιχεία υπολογιστικού και φυσικού μοντέλου

Τμήμα	Φυσικό μοντέλο – μάζα (kg)	Υπολ. μοντέλο– μάζα (kg)
Διάμετρος εμβόλου	0.28	0.35
Διάμετρος κυλίνδρου	0.6	0.55
Μήκος πτερυγίου	24	24
Πλάτος πτερυγίου	6.7	6.7
Ύψος πτερυγίου	0.74 (ends) – 0.97 (center)	0.9

Εικόνα 5.2 : Τεχνικά στοιχεία υπολογιστικού και φυσικού μοντέλου [34]

Με τη μελέτη του υπολογιστικού μοντέλου διεξήχθη το συμπέρασμα ότι οι δυνάμεις αδράνειας και οι υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο πτερύγιο καθορίζουν επί το πλείστον τη κίνησή του. Αντίθετα οι διαφορές μάζας μεταξύ κυλίνδρου και εμβόλου επηρεάζουν ελάχιστα τη δυναμική συμπεριφορά του. Επιπλέον το έμβολο / άξονας είναι προσδεδμεμένος από το ένα άκρο του στον πυθμένα της θάλασσας και δε συμμετέχει στη κατακόρυφη κίνηση. Το μειούμενο πάχος στις άκρες του πτερυγίου του φυσικού μοντέλου όπως φαίνεται και από τον πίνακα της εικόνας 50 (ύψος : 0,74 - 0,97) έχει ως

αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής και της αξιοπιστίας του πτερυγίου, ενώ παράλληλα δεν επιδρά σημαντικά στην απόκριση του συστήματος. [34]

5. Τεχνολογίες Μετατροπών Κυματικής Ενέργειας Υπεράκτιας Ζώνης

5.1. Τεχνολογίες Παλλόμενης Υδάτινης Στήλης (Π.Υ.Σ.)

5.1.1.BlueWave

Η Oceanlinx είναι μια εταιρία με πολυετή ενασχόληση στη κατασκευή μετατροπών κυματικής ενέργειας. Μέχρι στιγμή έχει κατασκευάσει και δοκιμάσει τρεις μετατροπείς τους οποίους είχε εγκαταστήσει στο Port Kembla, περίπου 100km νότια της Αυστραλίας. Οι τρεις αυτοί μετατροπείς αποτέλεσαν τους πρόδρομους των μετατροπών greenWAVE και blueWAVE, οι οποίοι κατασκευάστηκαν εκ των υστέρων.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το blueWAVE είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας του οποίου η λειτουργία βασίζεται στη παλλόμενη υδάτινη στήλη (Π.Υ.Σ.). Είναι μια πλωτή συσκευή και αποτελείται από έξι υδάτινες στήλες που είναι τοποθετημένες σε απόσταση μεταξύ τους. Το υλικό κατασκευής μπορεί πρακτικά να είναι οποιοδήποτε αρκεί να προσφέρει τις κατάλληλες ιδιότητες για την εφαρμογή, ωστόσο προτιμάται η χρήση χάλυβα.

Ο αέρας τον οποίο συμπιέζει η υδάτινη στήλη καθώς πάλλεται διέρχεται από έναν στρόβιλο airwave και σε συνδυασμό με μια γεννήτρια παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Ο στρόβιλος airwave είναι το μόνο κινητό μέρος της κατασκευής, κάτι που αυξάνει την αξιοπιστία της.

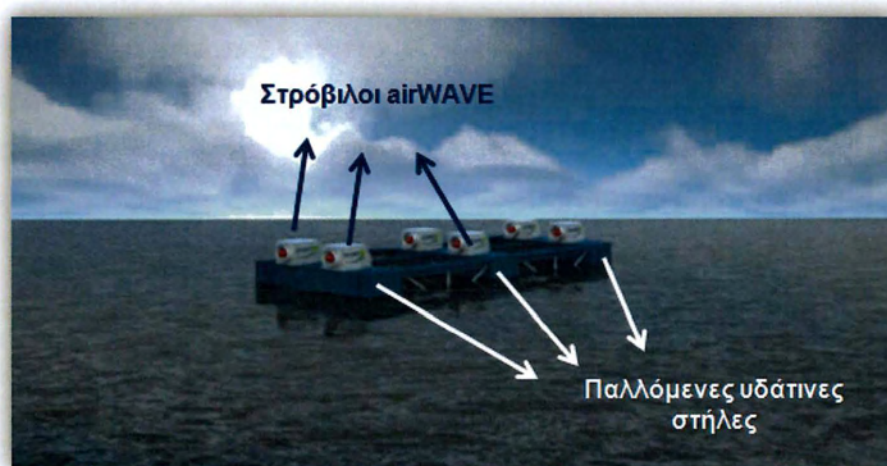
Το blueWAVE τοποθετείται στην επιφάνεια θάλασσας με βάθος από 40m – 80m και προσδένεται στον πυθμένα της.

Η μέθοδος πρόσδεσης της κατασκευής εξαρτάται κυρίως από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του πυθμένα της θάλασσας.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από το blueWAVE εξαρτάται από τις κυματικές συνθήκες της περιοχής τοποθέτησής του. Σε ένα σχετικά ευνοϊκό κλίμα το blueWAVE

έχει ισχύ εξόδου 2,5 MW. Όταν είναι αναγκαία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερης από 2,5MW, είναι δυνατή η εγκατάσταση πολλαπλών μονάδων στην ίδια τοποθεσία, συνδεδεμένων στην ακτή μέσω ενός ηλεκτρικού υποθαλάσσιου καλωδίου. Δεν υπάρχει θεωρητικός περιορισμός στον αριθμό των μονάδων που μπορούν να εγκατασταθούν σε μία τοποθεσία.

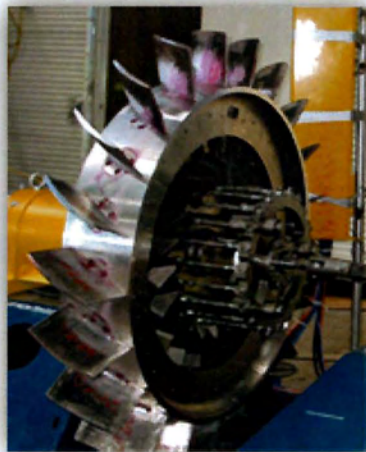
Όσο αφορά την αφαλάτωση του νερού, μια τυπική μονάδα blueWAVE μπορεί να παρέχει πάνω από 3 εκατομμύρια λίτρα γλυκού νερού την ημέρα. Μικρότερες μονάδες είναι επίσης διαθέσιμες, ενώ μεγαλύτερη χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί μέσω πολλαπλών μονάδων [35]



Εικόνα 5.3 : Μετατροπέας blueWAVE [35]

Ο στρόβιλος airWAVE

Οι περισσότεροι στρόβιλοι έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν όταν το ρευστό διέρχεται προς μια κατεύθυνση μόνο. Η χρήση αυτών των στροβίλων δεν ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, λόγω των υψηλών απωλειών και των αντιστάσεων που θα αναπτύσσονταν από τη διπλή ροή του αέρα εντός αυτών. Ο στρόβιλος airwave ο οποίος είναι μια βελτίωση του στροβίλου Denniss – Auld διαθέτει πτερύγια μεταβλητής κλίσης, που με πιο αργή περιστροφική κίνηση και λόγω της μεγάλης ροπής του στροβίλου βελτιώνουν την απόδοση και την αξιοπιστία του, ενώ παράλληλα μειώνουν το κόστος συντήρησης. [35]



Εικόνα 5.4 : πτερύγια στροβίλου airWAVE

Περιβαλλοντικά Οφέλη

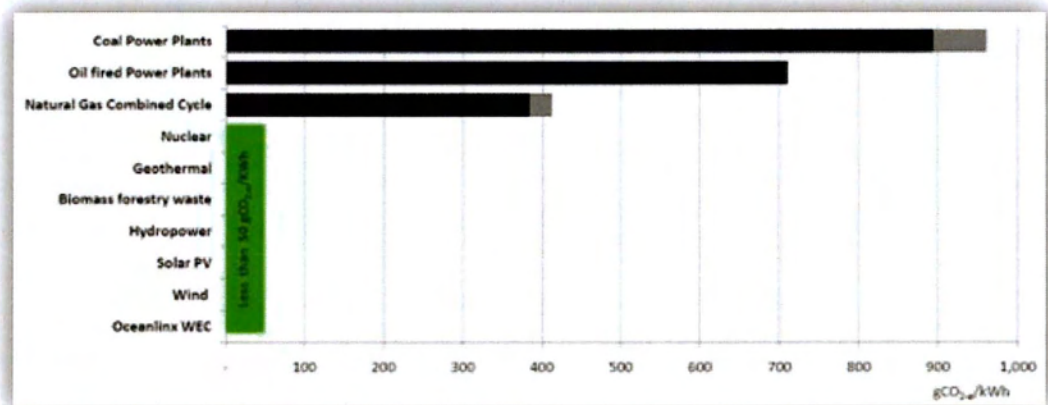
Με βάση τη μελέτη σχεδιασμού του blueWAVE και τον κύκλο ζωής του ο οποίος είναι περίπου 25 χρόνια, έχει δε εκτιμηθεί ότι οι εκπομπές για την κατασκευή και εγκατάστασή του κυμαίνονται στα 24g CO₂/kWh. Αυτές μπορούν να μεταβάλλονται ελαφρώς ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και κάποιους συντελεστές. Συγκρίνοντας τη ποσότητα των εκπομπών του blueWAVE με αυτές μιας συμβατικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα διαπιστώνουμε ότι παράγονται 33 φορές λιγότεροι ρίπτοι. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μειωθεί η παραγωγή 4.400 τόνων CO₂/έτος.

Σε περιοχές οι οποίες εξαρτώνται από την εισαγωγή καυσίμων για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών, το blueWAVE μπορεί να αποτελέσει μια αποτελεσματική και ασφαλή πηγή παροχής ενέργειας, ενώ παράλληλα συνεισφέρει στη μείωση των εκπομπών.

Η μόνη συνεισφορά στις εκπομπές CO₂ από το blueWAVE είναι πρακτικά έμμεση και γίνεται κατά την εξόρυξη και επεξεργασία των υλικών κατασκευής του, από τη διαδικασία συναρμολόγησής του και τη μεταφορά του στην περιοχή εγκατάστασης. Αυτές οι εκπομπές εκτιμάται ότι θα μειωθούν μελλοντικά βελτιώνοντας τη διαδικασία κατασκευής του και την απόδοσή του.

Επίσης σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι το blueWAVE δεν περιλαμβάνει κινητά μέρη υποθαλάσσια και έτσι ελαχιστοποιείται η επιβάρυνση του θαλάσσιου περιβάλλοντος.

Η συσκευή θα τοποθετείται αρκετά μακριά από την ακτή ώστε να ελαχιστοποιείται η οπτική και η ακουστική ρύπανση. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι εκπομπές συσκευών που εκμεταλλεύονται διάφορες πηγές ενέργειας στον κύκλο ζωής τους και συγκρίνονται με το blueWAVE.



Εικόνα 5.5 : Σύγκριση εκπομπών διαφόρων τεχνολογιών με του blueWAVE [35]

5.1.2.Backward Bent Duct Buoy

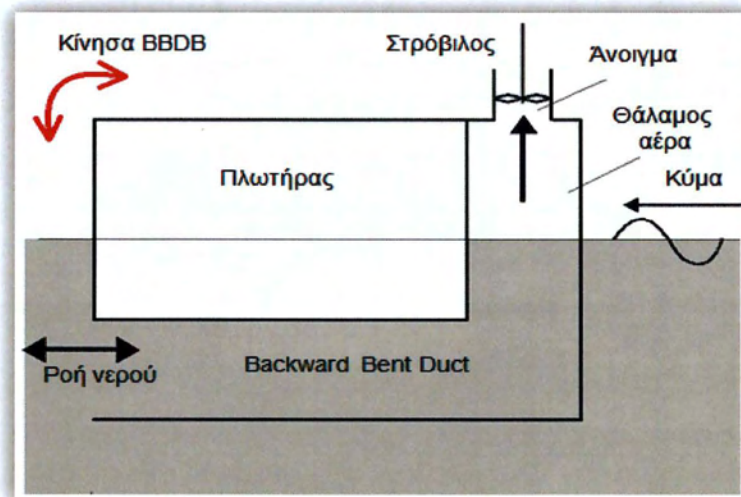
Το Backward Bent Duct Buoy (BBDB) είναι ένας πλωτός μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος βασίζεται στην αρχή της Π.Υ.Σ.. Προτάθηκε το 1986 από τον Yoshio Masuda και έπειτα εξελίχθηκε αποκτώντας τη μεταγενέστερη μορφή του. [36]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το BBDB αποτελείται από έναν αγωγό σχήματος "L". Ένα τμήμα του αγωγού βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και ένα άλλο πάνω από αυτή. Εντός του αγωγού διαμορφώνεται η Π.Υ.Σ. Το άκρο του αγωγού που βρίσκεται υποθαλάσσια είναι ελεύθερο και επιτρέπει την είσοδο του νερού, ενώ στο άλλο άκρο που βρίσκεται στην επιφάνεια έχει προσαρμοστεί ένας στρόβιλος ο οποίος συνδέεται με μια ηλεκτρική γεννήτρια για τη παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο επάνω μέρος και κατά μήκος του αγωγού που βρίσκεται υποθαλάσσια είναι τοποθετημένος ένας πλωτήρας ώστε να μπορεί να πλέει η κατασκευή. Το BBDB προσδένεται στον πυθμένα της θάλασσας.

Η μετατροπή της κυματικής σε ηλεκτρική ενέργεια, όπως σε όλες τις εφαρμογές της Π.Υ.Σ. γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά όταν τα κύματα πλησιάσουν τη συσκευή η στήλη ύδατος ανυψώνεται και συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται πάνω από αυτή. Στο δεύτερο

στάδιο ο αέρας υψηλής πίεσης διέρχεται μέσα από τον στρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά του θέτει σε λειτουργία την ηλεκτρογεννήτρια και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Στην παρακάτω φωτογραφία φαίνεται σχηματικά η λειτουργία του BBDB. [36]

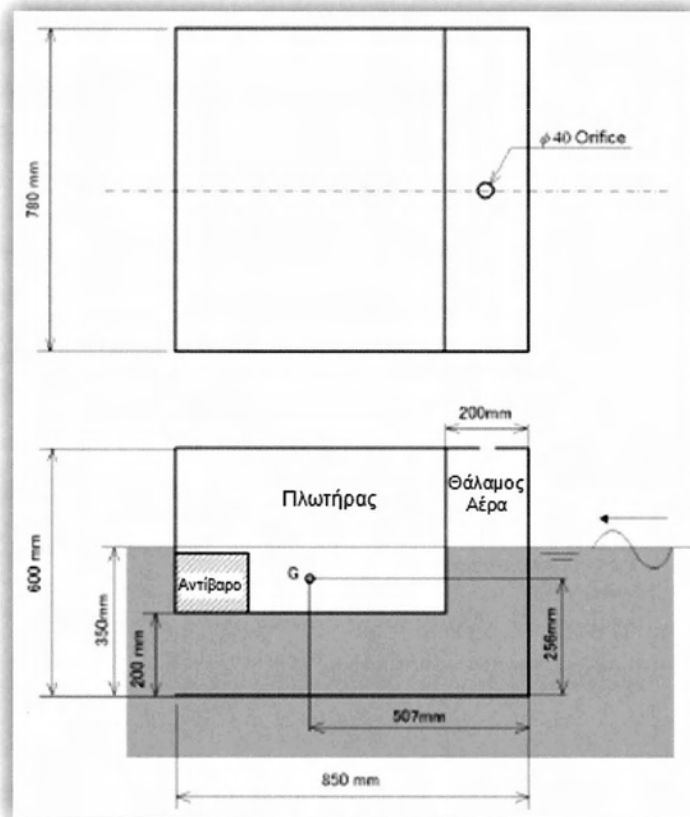


Εικόνα 5.6 : Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του BBDB

Τα πρώτα πειράματα που διεξήχθησαν ήταν προσπάθειες για τη βελτίωση του πρώτου σταδίου μετατροπής, αυτού της κυματικής ενέργειας σε υδραυλική. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε και θα σχολιάσουμε τα αποτελέσματα ενός εκ των πειραμάτων.

Πειραματικό Μοντέλο

Το πείραμα αυτό αφορά το πώς μπορεί να επηρεάσει η επιμήκυνση του ελεύθερου άκρου του αγωγού την απόδοσή του μοντέλου. Στη εικόνα 5.7 φαίνονται οι διαστάσεις του BBDB που χρησιμοποιήθηκε. Η επιμήκυνση του αγωγού έγινε κατά 15cm και 45cm. Για να μπορέσει να διατηρηθεί σε σταθερό επίπεδο ο πλωτήρας, χρησιμοποιήθηκε ένα αντίβαρο 37,5kg στο κύριο σώμα του πλωτήρα όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7. Ο έλεγχος της στάθμης του νερού στην υδάτινη στήλη γίνεται με δύο αισθητήρες υπερήχων και η πίεση με έναν αισθητήρα πίεσης. Η συχνότητα δειγματοληψίας των αποτελεσμάτων έγινε με συχνότητα 20Hz, ενώ η κίνηση του μοντέλου καταγράφηκε σε φωτογραφίες με συχνότητα λήψης τους στα 10Hz. Τα πειράματα έγιναν σε δεξαμενή παραγωγής κυμάτων και τα ύψη κύματος ήταν 2,5 – 3,0 cm. [37]



Εικόνα 5.7 : Διαστάσεις αρχικού BBDB

	Μήκος	Πλάτος	Βάθος
Saga University	18.0m	0.8 m	1.0m
Kyushu University	65.0m	5.0 m	7.0m

Εικόνα 5.8 : Μέγεθος δεξαμενών παραγωγής κυμάτων

Η απόδοση της κύριας μετατροπής της κυματικής ενέργειας σε υδραυλική εκφράζεται από τη σχέση [37] :

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

Με :

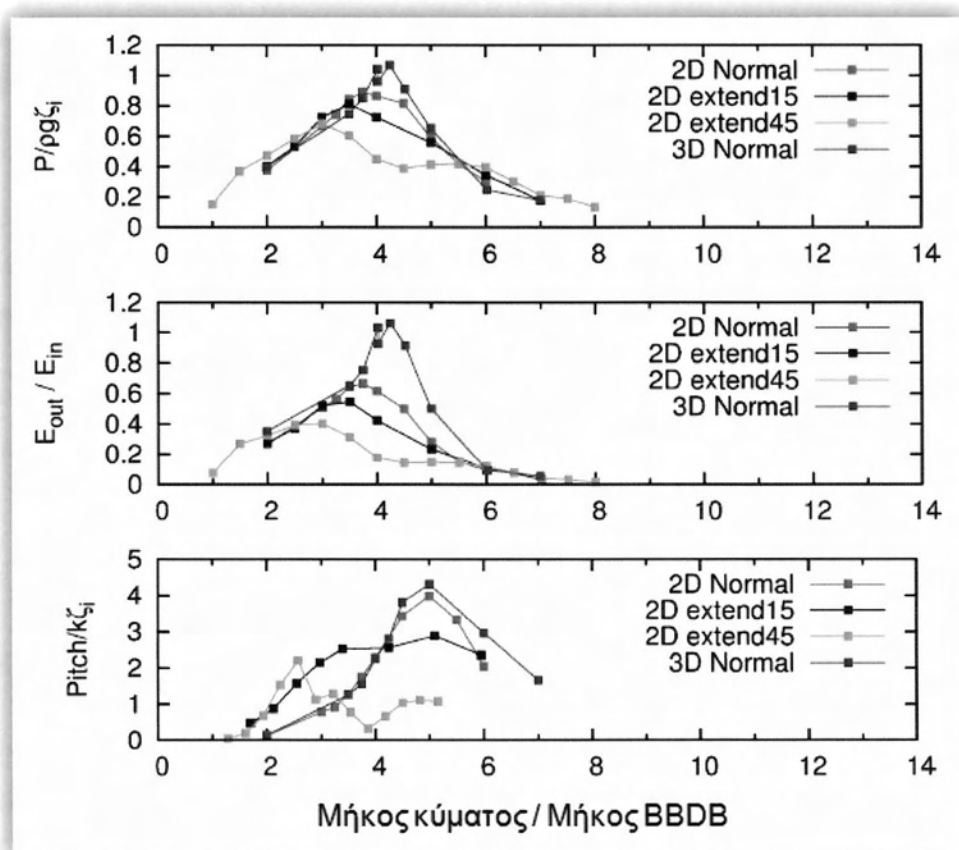
$$E_{in} = \frac{1}{2} r g \zeta_i^2 C_g B$$

$$E_{out} = \frac{S}{T} \int_0^T p(t) \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\eta_1(t) + \eta_2(t)}{2} \right) dt$$

Όπου :

- ✦ E_{in} : η ενέργεια που περιέχεται στο διερχόμενο κύμα
- ✦ E_{out} : η ενέργεια στον συμπιεσμένο αέρα
- ✦ ρ : η πυκνότητα του νερού
- ✦ g : η επιτάχυνση της βαρύτητας
- ✦ ζ_i : το πλάτος του διερχόμενου κύματος
- ✦ C_g : ταχύτητα διερχόμενου κύματος
- ✦ B : πλάτος BBDB
- ✦ S : εμβαδόν θαλάμου αέρα
- ✦ T : περίοδος του διερχόμενου κύματος
- ✦ $P(t)$: πίεση στον θάλαμο αέρα
- ✦ $\eta_1(t), \eta_2(t)$: στάθμη νερού στην υδάτινη στήλη

Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα πίεσης, απόδοσης και το πλάτος της ταλάντωσης του BBDB



Εικόνα 5.9 : Διάγραμμα πίεσης και απόδοσης και πλάτος ταλάντωσης BBDB [37]

Παρατηρώντας τα διαγράμματα διαπιστώνουμε ότι με την αύξηση του μήκους του αγωγού η πίεση εντός του θαλάμου μειώνεται και σαν αποτέλεσμα έχει τη μείωση της

απόδοσης της κύριας μετατροπής. Επίσης από το διάγραμμα ταλάντωσης του BBDB συμπεραίνουμε ότι για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση από το σύστημα είναι απαραίτητη η ταλάντωσή του με μεγαλύτερο πλάτος.

Απόδοση και Οικονομία

Η αύξηση της απόδοσης του BBDB μπορεί να γίνει με τη χρήση περισσότερων μονάδων BBDB σε σειρά. Μια σειρά από δύο οι περισσότερες μονάδες BBDB έχει ονομαστεί terminator. Με διάφορα πειράματα που έχουν γίνει βρέθηκε ότι η απόδοση με τη χρήση πολλαπλών BBDB αυξάνεται κατακόρυφα. Χαρακτηριστικά για τρία BBDB σε σειρά η απόδοση μπορεί να αυξηθεί κατά 30%.

Με λειτουργία ενός μοντέλου, το οποίο περιλαμβάνει τέσσερα BBDB, στις νότιες ακτές της Ιρλανδίας, η μέση ισχύς εξόδου του αέρα έχει υπολογιστεί στα 1.815kW και η ηλεκτρική ισχύς εξόδου στα 907kW με απόδοση 50% (60% απόδοση στροβίλου και 85% απόδοση ηλεκτρογεννήτριας). Η μέγιστη ισχύς εξόδου έχει εκτιμηθεί ότι είναι 3.000kW.

Το κόστος για το εν λόγω terminator τεσσάρων BBDB σε πραγματικό μέγεθος (περίπου 36 φορές μεγαλύτερο από αυτό του πειραματικού μοντέλου) με υλικό κατασκευής χάλυβα πάχους 12mm εκτιμάται στα 3.180.000 ευρώ.

Με τη χρήση τεσσάρων Π.Υ.Σ. σε σειρά απαιτείται η χρήση δυο στροβίλων. Το κόστος κάθε στροβίλου ανέρχεται στα 1.060.000 ευρώ, οπότε συνολικά 2.120.000 ευρώ.

Το κόστος της διαδικασίας πρόσδεσης και του συστήματος πρόσδεσης έχει υπολογιστεί στα 1.060.000 ευρώ. Το κόστος ρυμούλκησης και εγκατάστασης ανέρχεται στα 424.000 ευρώ.

Το σύνολο των καλωδιώσεων κοστίζει 424.000 ευρώ.

Το συνολικό κόστος αθροίζοντας τα επιμέρους κόστη, ανέρχεται στα 8.268.000 ευρώ.

Με απόσβεση της τάξεως του 8% ανά χρόνο και 5% ανά χρόνο για συντήρηση του συστήματος, δηλαδή 13% ανά χρόνο συνολικά, τα ετήσια έσοδα ανέρχονται στα 1.074.840 ευρώ/έτος ($8.268.000 \cdot 0,13 = 1.074.840$). Όπως προαναφέραμε η μέση ισχύς εξόδου είναι 907kW. Οπότε η συνολική ετήσια ισχύς είναι 7.945.320 kWh/έτος ($907 \text{ kW} \cdot 24 \text{ h/ημέρα} \cdot 365 \text{ ημέρες}$). Συνεπώς το κόστος πώλησης της kWh ανέρχεται στα 13,5 λεπτά / kWh κόστος το οποίο πρέπει να μειωθεί ώστε το BBDB να είναι καταστεί μια ανταγωνιστική τεχνολογία στον τομέα των μετατροπών κυματικής ενέργειας. [36]

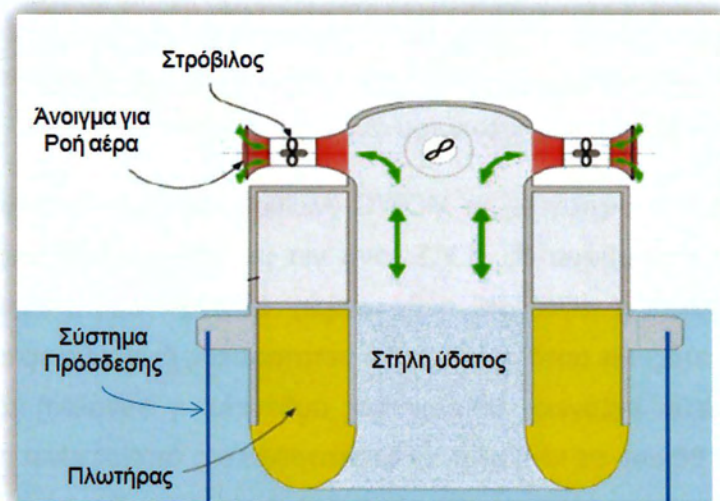
5.1.3.Sperboy

Το Sperboy είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει αναπτυχθεί και κατασκευάζεται από την Empley Energy. Τοποθετεί 13km – 19km από την ακτή σε μεγάλα βάθη ώστε να εκμεταλλεύεται το υψηλότερο κυματικό δυναμικό τους. Βασικός στόχος της εταιρείας είναι η αύξηση του κύκλου ζωής της συσκευής στα 50 χρόνια, η αύξηση του επιπέδου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και παράλληλα η μείωση του κόστους συντήρησης.

Το Sperboy είναι επίσης φιλικό προς το περιβάλλον, λόγω της απουσίας μεγάλων ποσοτήτων ρυπογόνων προϊόντων όπως τα λιπαντικά. [38]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Sperboy είναι ένας πλωτός υπεράκτιος μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει ως βασική αρχή λειτουργίας του την Π.Υ.Σ.. Στην επιφάνεια της θάλασσας πάνω σε έναν πλωτήρα είναι τοποθετημένα ο στρόβιλος, η ηλεκτρογεννήτρια και όλα τα συστήματα τα οποία συμβάλουν στη μετατροπή της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στο κάτω μέρος του πλωτήρα βρίσκεται ένας κυλινδρικός αγωγός εντός του οποίου δημιουργείται η Π.Υ.Σ.. Η συσκευή προσδένεται στον πυθμένα της θάλασσας. [8],[38]



Εικόνα 5.10 : Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του Sperboy

Ο τρόπος λειτουργίας του Sperboy είναι όμοιος με κάθε άλλης συσκευής Π.Υ.Σ.. Καθώς διέρχονται τα κύματα η συσκευή ταλαντώνεται. Το νερό που βρίσκεται εντός του κυλινδρικού αγωγού συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται από πάνω του και αυτός με τη

σειρά του διέρχεται εντός ενός στροβίλου ο οποίος δίνει κίνηση σε μια ηλεκτρογεννήτρια για τη παραγωγή ρεύματος.

Η διαφορά του Sperboy σε σχέση με τις συσκευές Π.Υ.Σ. που τοποθετούνται επάκτια είναι ότι α) μπορεί να εκμεταλλευτεί το υψηλότερο ενεργειακό δυναμικό των κυμάτων σε μεγάλα βάθη β) όλη η κατασκευή είναι πλευστή και έτσι μπορεί να προσαρμόζεται στα διερχόμενα κύματα, κάτι που συνεπάγεται τη βέλτιστη υδροδυναμική απόδοση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλό κόστος.

Η εγκατάσταση του Sperboy αποτελείται από τα εξής επιμέρους βήματα :

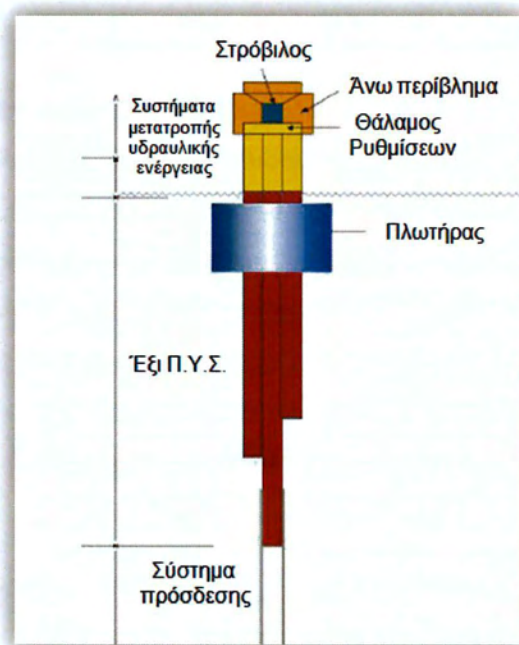
- Εγκατάσταση του συστήματος πρόσδεσης στον πυθμένα της θάλασσας
- Τοποθέτηση των καλωδίων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από την ακτή στη φάρμα των μετατροπών
- Εγκατάσταση των συσκευών και σύνδεσή τους με τα καλώδια
- Εκκίνηση λειτουργίας των συσκευών για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η απαιτούμενη βασική υποδομή καθορίζεται από τη τοποθεσία της εγκατάστασης της μονάδας. Το κύριο σώμα της συσκευής μπορεί να κατασκευαστεί στην κοντινότερη ακτή και έπειτα να ρυμουλκηθεί μέχρι την περιοχή εγκατάστασης.

Στόχος της Empley Energy είναι η εγκατάσταση μιας φάρμας αποτελούμενη από 1.000 συσκευές. Η εν λόγω εγκατάσταση θα καταλαμβάνει έκταση περίπου 10-15 m².

Η συντήρηση ρουτίνας μπορεί να πραγματοποιείται επί της συσκευής, ενώ οι σημαντικότερες εργασίες να γίνονται στην ακτή. Στόχος της σχεδίασης του Sperboy είναι η ελαχιστοποίηση των απαιτήσεων του συστήματος για συντήρηση.

Εξέλιξη του Sperboy αποτελεί το MOWC (Multiple Oscillating Water Column). Αυτός ο μετατροπέας περιλαμβάνει έξι Π.Υ.Σ. αντί για μια όπως το Sperboy. Το πλεονέκτημα αυτής της συσκευής είναι ότι κάθε στήλη ύδατος “συντονίζεται” σε διαφορετική συχνότητα κύματος. Με αυτό τον τρόπο ο μετατροπέας διευρύνει το φάσμα κυμάτων από τα οποία δεσμεύει ενέργεια και συνεπώς αυξάνεται η συνολική του απόδοση. Οι έξι στήλες ύδατος θέτουν σε κίνηση έναν αεροστρόβιλο ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μια ηλεκτρογεννήτρια για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με τις έρευνες που έγιναν βρέθηκε ότι ρυθμίζοντας αναλόγως το σύστημα πρόσδεσης αυξάνεται το επίπεδο απόδοσης του συστήματος και μπορεί να αυξηθεί από 20-25%.



Εικόνα 5.11 : Σχηματική απεικόνιση του MOWC [8]



Εικόνα 5.12 : Δοκιμαστικό MOWC [38]

Απόδοση

Τα χαρακτηριστικά του Sperboy όπως η απλότητα της κατασκευής του, η ευκολία συντήρησης, ο μεγάλος κύκλος ζωής και το μικρό κόστος συντήρησης το καθιστούν ως μια εκ των κορυφαίων τεχνολογιών Π.Υ.Σ.. Με λειτουργία του στον ατλαντικό ωκεανό κοντά στα παράλια Ευρώπης έχει υπολογιστεί ότι η ισχύς εξόδου είναι περίπου 1MW. Κατάλληλες περιοχές για την εγκατάστασή του κρίνονται επίσης ο Καναδάς, οι Η.Π.Α., η Ιαπωνία, η Νότια Αφρική και η Νέα Ζηλανδία. Το σύνολο των υπαρχόντων μετατροπένων κυματικής ενέργειας εκτιμάται ότι συνεισφέρουν με 50 TWh στην αγορά ενέργειας.[8],[38]

Οικονομικά Οφέλη

Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Sperboy σύμφωνα με τις πρόσφατες εκτιμήσεις κυμαίνεται από 63 – 178 ευρώ/MWh. Το τιμή πώλησης ενέργειας από Α.Π.Ε. στο Ηνωμένο Βασίλειο κυμαίνεται από 89 – 127 ευρώ/MWh. Στη Πορτογαλία το κόστος της ενέργειας που προέρχεται από κυματικούς μετατροπείς είναι περίπου 306 ευρώ, αρκετά υψηλότερο από αυτό του Ηνωμένου Βασιλείου. Φαίνεται καθαρά λοιπόν ότι το Sperboy είναι μια πολλή ανταγωνιστική τεχνολογία μιας και μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια με αρκετά χαμηλό κόστος. Ο συνδυασμός της απλής κατασκευής του, του μεγάλου κύκλου ζωής και του χαμηλού κόστους παραγωγής ενέργειας το καθιστούν ως έναν από τους κορυφαίους μετατροπείς κυματικής ενέργειας.

Σύμφωνα με την Carbon Trust οι κεφαλαιουχικές δαπάνες παγκοσμίως για τους κυματικούς μετατροπείς είναι περίπου 638 δις ευρώ. Ένα ρεαλιστικό ποσοστό κατοχής της τάξεως του 20% αυτής της αγοράς από το Sperboy μέσα στην εικοσαετία, εκτιμάται ότι οι ετήσιες απολαβές θα ανέρχονται στα 6,38 δις ευρώ. Για να γίνουν περισσότερο αντιληπτά τα μεγέθη, αρκεί να αναλογιστούμε ότι η αγορά εκμετάλλευσης του αέρα είναι πολλή μεγαλύτερη. [38]

5.2. Τεχνολογίες Υπέρβασης / Υπερύψωσης

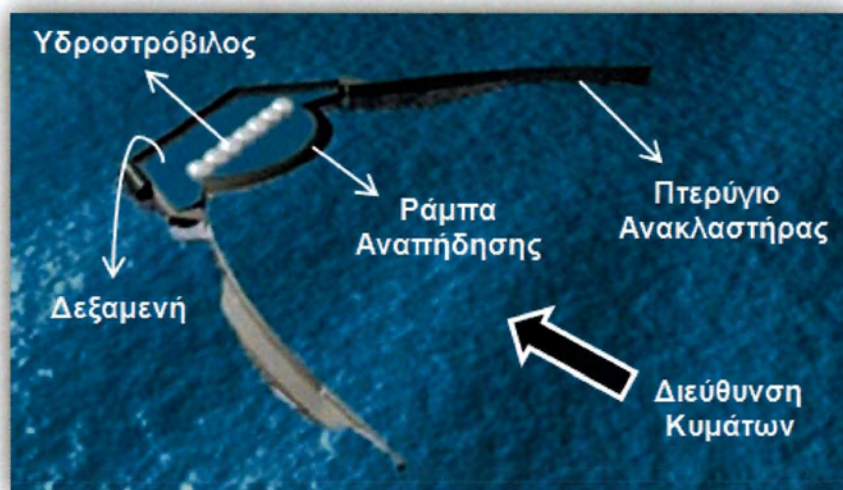
5.2.1. Wave Dragon

Το Wave Dragon είναι ένας πλωτός μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει ως αρχή λειτουργίας του τη τεχνολογία της υπερπήδησης. Η συσκευή προτάθηκε το 1986 από τον εφευρέτη Erik Friis-Madsen και το 1994 κατοχυρώθηκε επίσημα στο γραφείο ευρεσιτεχνίας. Κατά τη περίοδο 1995-1999 με χρηματοδότηση από το Δανέζικο πρόγραμμα κυματικής ενέργειας (Danish Wave Energy Program) διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων σε ένα πρωτότυπο μοντέλο κλίμακας 1:50 στο Πανεπιστήμιο του Aalborg. Τη μετέπειτα χρηματοδότηση για τα πειράματα στους στροβίλους και στον εξοπλισμό ελέγχου της συσκευής ανέλαβε η Ευρωπαϊκή Ένωση. Το συνολικό κόστος του έργου ανέρχεται στο 1 εκ. ευρώ εκ των οποίων το 50% ανέλαβε η Ε.Ε.. Μετά τα επιτυχή πειράματα, τον Απρίλιο του 2003 στο νησί Nissum Bredning βόρεια της Δανίας έγινε η πρώτη εγκατάσταση Wave Dragon. Αυτή η συσκευή ήταν ο πρώτος μετατροπέας κυματικής ενέργειας που συνδέθηκε σε δίκτυο. [11]

Ο σημερινός στόχος της Wave Dragon Ltd είναι η κατασκευή μιας μονάδας με πολλαπλά Wave Dragon που θα εγκατασταθεί κοντά στην ακτή Pembrokeshire Νότια της Ουαλίας.

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Wave Dragon είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας ο οποίος έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί σε βάθη πάνω από 20m. Έχει ως αρχή λειτουργίας του μια από τις σημαντικότερες και πιο πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες στον τομέα των μετατροπών κυματικής ενέργειας, τη τεχνολογία υπερπήδησης. Σε αντίθεση με τους περισσότερους πλωτούς μετατροπείς δεν ταλαντώνεται με τα κύματα, αλλά εκμεταλλεύεται τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται από την υπερπήδηση αυτών. Η εμπρός όψη της συσκευής αποτελείται από μια καμπυλωτή ράμπα η οποία μπορεί και ανυψώνει τα διερχόμενα κύματα. Στο πίσω μέρος της ράμπας είναι τοποθετημένη μια δεξαμενή εντός της οποίας συλλέγεται το νερό από τα κύματα που ανύψωσε η ράμπα (overtopping). Το φαινόμενο ενισχύεται με δυο πτερύγια τα οποία λειτουργούν σαν ανακλαστήρες. Τα πτερύγια συγκεντρώνουν και κατευθύνουν τα κύματα προς τη ράμπα, ώστε μεγαλύτερη ποσότητα νερού να υπερπηδήσει εντός της δεξαμενής. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται καθώς το αποταμιευμένο νερό της δεξαμενής διέρχεται εντός ενός υδροστρόβιλου που είναι τοποθετημένος στο εσωτερικό της. [8],[11],[39]



Εικόνα 5.13 : Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του Wave Dragon

Η ισχύς εξόδου του Wave Dragon κυμαίνεται από 4MW - 11MW ή περισσότερο ανάλογα με το ενεργειακό δυναμικό των κυμάτων. Η πρωτότυπη συσκευή που τοποθετήθηκε στο νησί Nissum Bredning έχει άνοιγμα πτερυγίων 300m, πλάτος δεξαμενής 97m και ζυγίζει 30.000 τόνους. Το μεγάλο μέγεθος της συσκευής και η μορφή της συνεπάγεται αρκετά πλεονεκτήματα. Η καταπόνησή της από τις ασκούμενες δυνάμεις είναι ελάχιστες. Επίσης είναι σταθερή και στιβαρή κατασκευή κάτι που κάνει εφικτή τη συντήρησή της χωρίς να χρειαστεί πολύωρη διακοπή της λειτουργίας της για απόσυρσή στην ακτή.

Το Wave Dragon έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα μόνα κινητά μέρη του να είναι οι υδροστρόβιλοι. Αυτό συμβάλει σημαντικά όχι μόνο στη μείωση του κόστους συντήρησης, αλλά και στην ελαχιστοποίηση των επικαθήσεων από θαλάσσιους οργανισμούς σε ζωτικά τμήματα της συσκευής. [11]

Το ενεργειακό περιεχόμενο των κυμάτων είναι ιδιαίτερα ισχυρό και για αυτό κατά τη σχεδίαση του Wave Dragon έχουν ληφθεί σοβαρά υπόψη τα παρακάτω :

- Ένα σύστημα αγκυροβόλησης παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται για την αγκυροβόληση των πλοίων, απορροφά τις δυνάμεις που ασκούνται στη συσκευή από τα ισχυρά κύματα και τους ανέμους.
- Για τη μείωση των δυνάμεων αντίδρασης του συστήματος αγκυροβόλησης και των πτερυγίων έχει σχεδιαστεί και δοκιμαστεί μια ειδικά διαμορφωμένη διάταξη καλωδιώσεων.
- Οι ακραίες κυματικές συνθήκες δεν αποτελούν πρόβλημα. Οι δοκιμές των μοντέλων έχουν αποδείξει ότι τα υψηλά κύματα “υπερπηδούν” τη συσκευή χωρίς τη πρόκληση καταστροφής της.
- Οι ισχυροί άνεμοι δεν αποτελούν βασικό πρόβλημα διότι το Wave Dragon πλέει σχετικά χαμηλά και η έκθεσή του σε αυτούς είναι ελάχιστη

Πτερύγια / Ανακλαστήρες

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του Wave Dragon είναι τα πτερύγια που είναι προσαρμοσμένα στη δεξαμενή. Όπως προαναφέραμε στόχος τους είναι η συγκέντρωση των διερχόμενων κυμάτων στην καμπυλωτή ράμπα. Η ποσότητα του νερού που θα αναπηδήσει, εξαρτάται από το ύψος των κυμάτων, επομένως ακόμη και μια μικρή αύξηση του ύψους των κυμάτων συνεπάγεται αυξημένη ποσότητα ενέργειας που θα αναπηδήσει στην δεξαμενή.

Προκειμένου να επιλεγεί το κατάλληλο μήκος, γωνία και θέση των πτερυγίων ο Kramer και ο Frigaard (2002) δημιούργησαν ένα υπολογιστικό μοντέλο βασισμένο σε 3D μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Ως όρια του χρησιμοποιούμενου πλέγματος τέθηκαν τα όρια της κατασκευής, κατά συνέπεια μειώθηκε ο χρόνος επεξεργασίας των δεδομένων και αυξήθηκε η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Για να ελεγχθεί η ακρίβεια του υπολογιστικού μοντέλου, κατασκευάστηκε ένα πειραματικό μοντέλο και διεξήχθησαν πειράματα σε μια δεξαμενή παραγωγής κυμάτων. Τα αποτελέσματα των δυο μοντέλων αποδείχθηκε ότι είναι πολύ κοντά.

Τα πτερύγια είναι πλωτά και έχουν τη δυνατότητα να ανακλούν καλύτερα κύματα υψηλής συχνότητας παρά χαμηλής. Αυτά τα κύματα συνήθως είναι τα μικρά. Αυξάνοντας λοιπόν το εύρος της συσκευής ώστε περισσότερα κύματα να κατευθύνονται στη ράμπα διαπιστώθηκε αύξηση της ενέργειας έως και 85%. Η παρουσία των πτερυγίων προσδίδει επιπλέον πλεονεκτήματα στη κατασκευή όπως :

- Μειώνει τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις του συστήματος πρόσδεσης
- Καλύτερη ανταπόκριση της συσκευής σε ακραίες κυματικές συνθήκες
- Αυξημένη σταθερότητα του κύριου τμήματος του Wave Dragon

Τα πτερύγια εκτός των παραπάνω αυξάνουν την ισορροπία της συσκευής στην επιφάνεια των κυμάτων. Καθώς επιπλέουν αντισταθμίζουν κάθε τάση της συσκευής από το να βρεθεί εκτός ισορροπίας, κάτι που θα οδηγούσε σε έξοδο του νερού της δεξαμενής ξανά στη θάλασσα και έτσι θα μειωνόταν η απόδοση. [11],[39]

Υδροστρόβιλος

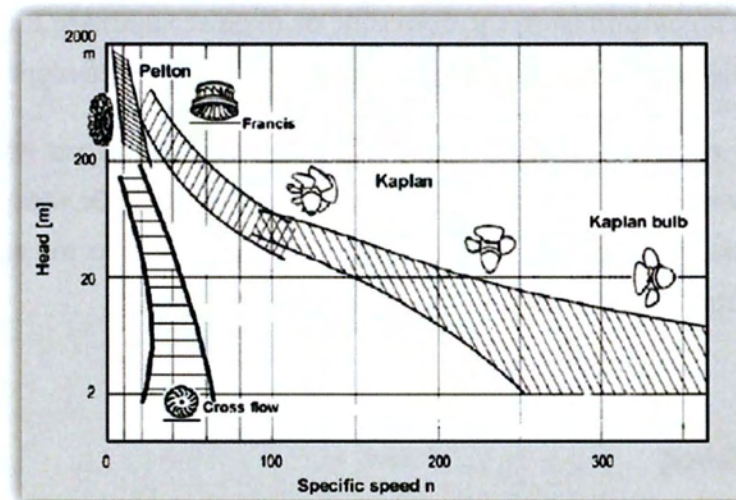
Το Wave Dragon είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε τα μοναδικά κινούμενα μέρη του να είναι οι στρόβιλοι. Οι υδροστρόβιλοι οι οποίοι είναι κατάλληλοι για τη συγκεκριμένη εφαρμογή χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες σε υδροηλεκτρικά εργοστάσια και έχουν υψηλή απόδοση και αξιοπιστία. Στη Γαλλία στον σταθμό του La Rance 240MW χρησιμοποιούνται τέτοιοι υδροστρόβιλοι από το 1967. Αντιθέτως λοιπόν με τους υπόλοιπους μετατροπείς κυματικής ενέργειας στη περίπτωση του Wave Dragon χρησιμοποιείται μια δοκιμασμένη και βελτιωμένη τεχνολογία για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι συνθήκες λειτουργίας ενός υδροστρόβιλου που χρησιμοποιείται στον μετατροπέα διαφέρουν ελαφρώς από αυτές ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου. Στο Wave Dragon το υδροδυναμικό ύψος κυμαίνεται από 1m – 4m και βρίσκεται στο χαμηλότερο όριο των υπαρχόντων υδροστροβίλων. Σε ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο οι μεταβολές στο υδροδυναμικό ύψος και στη ροή ενός στρόβιλου είναι ελάχιστες. Σε αντίθεση, στο Wave Dragon οι μεταβολές είναι αρκετά εντονότερες και επιβάλουν έναν διαφορετικό τρόπο λειτουργίας του στρόβιλου.

Σε ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο το οποίο τροφοδοτείται από τα νερά ενός ποταμού ο αναμενόμενος κύκλος ζωής των στρόβιλων είναι 40 – 80 χρόνια. Στη περίπτωση της συσκευής μας όμως οι συνθήκες λειτουργίας είναι πολλή δυσμενέστερες και οι εργασίες συντήρησης αρκετά δυσκολότερες. Συνεπώς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία θα

πρέπει να ικανοποιούνται είναι η απλότητα της κατασκευής και όχι τόσο η επίτευξη της μέγιστης απόδοσης.

Στην εικόνα 5.14 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα το οποίο δείχνει το εύρος των εφαρμογών των γνωστών στροβίλων με βάση το υδροδυναμικό τους ύψος και της περιστροφικής τους ταχύτητας.



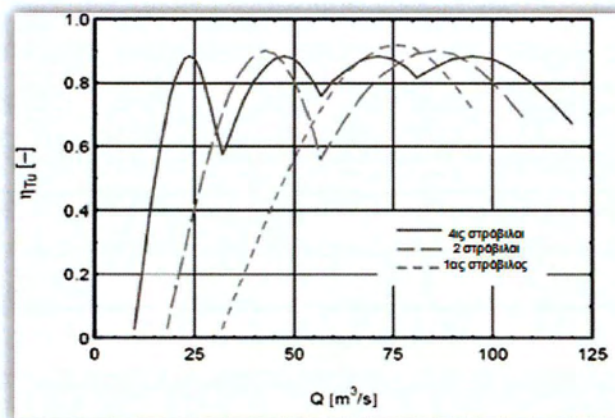
Εικόνα 5.14 : Εύρος εφαρμογών στροβίλων[11]

Ο στρόβιλος Kaplan είναι ο ιδανικός στρόβιλος για το επιθυμητό υδροδυναμικό ύψος. Τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να βελτιστοποιείται η ενεργειακή μετατροπή στο σημείο σχεδιασμού του στροβίλου, το οποίο ορίζεται ως το σημείο λειτουργίας με τον συνδυασμό της βέλτιστης τιμής του υδροδυναμικού ύψους και της ροής σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Σε οποιοδήποτε άλλο σημείο λειτουργίας πέραν του σημείου σχεδιασμού υπάρχει "ασυμφωνία" μεταξύ της γωνίας ροής και της γωνίας των πτερυγίων, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση του στροβίλου. Οποτεδήποτε ένας στρόβιλος είναι απαραίτητο να λειτουργεί υπό ένα μεγάλο εύρος υδροδυναμικού ύψους και παροχής, η καμπύλη του είναι επιθυμητό να είναι όσο το δυνατόν πιο οριζόντια. Αυτό το κριτήριο ικανοποιείται από τον στρόβιλο Kaplan.

Στο Wave Dragon χρησιμοποιείται ένας αριθμός από μικρότερους υδροστροβίλους αντί για έναν μεγάλο με την ίδια απόδοση. Η χρήση πολλών υδροστροβίλων έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- ♦ Διακόπτοντας τη λειτουργία κάποιων εκ των στροβίλων σε μειωμένο ρυθμό ροής είναι εφικτή η ρύθμιση της ροής στους υπόλοιπους στροβίλους έτσι ώστε να μη θυσιαστεί η συνολική απόδοση του συστήματος (εικόνα 5.15)
- ♦ Είναι εφικτή η συντήρηση καθενός στροβίλου χωριστά, με συνέχιση της παραγωγής από τους υπόλοιπους στροβίλους

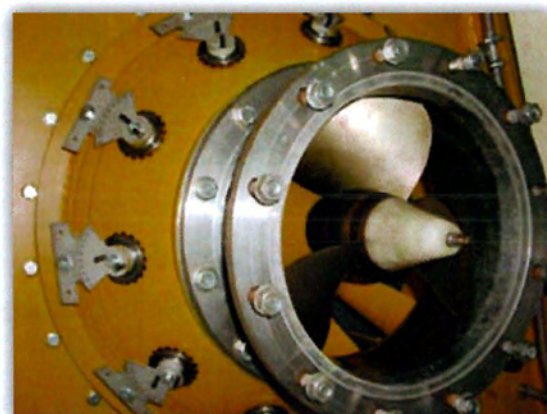
- ✦ Λόγω του μικρού μεγέθους των στροβίλων η ρυμούλκηση και η μεταφορά τους στην ακτή, ώστε να γίνει συντήρησή τους είναι ευκολότερη
- ✦ Οι μικροί στρόβιλοι επιτυγχάνουν υψηλότερες ταχύτητες, κάτι που μειώνει το κόστος της ηλεκτρογεννήτριας



Εικόνα 5.15 : Διάγραμμα απόδοσης – ροής για απλό και πολλαπλούς στροβίλους [11]

Αναλόγως με τη τοποθεσία εγκατάστασης του Wave Dragon, μπορούν να τοποθετηθούν από 16 – 24 στρόβιλοι για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς οι στρόβιλοι έχουν σταθερή ταχύτητα και είναι συνδεδεμένοι με ηλεκτρογεννήτριες οι οποίες τροφοδοτούν με ηλεκτρική ενέργεια δίκτυα σταθερής συχνότητας. Στη περίπτωση του Wave Dragon, η ταχύτητα και το υδροστατικό δυναμικό. Αυτό έχει ως συνέπεια να μεταβάλλεται και η συχνότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Γ' αυτό η ηλεκτρογεννήτρια αρχικά συνδέεται με έναν μετατροπέα συχνότητας για να προσαρμόσει τη συχνότητα της παραγόμενης ενέργειας στη συχνότητα του δικτύου και έπειτα τροφοδοτεί το δίκτυο. [11],[39]



Εικόνα 5.16 : Στρόβιλος Kaplan του Wave Dragon [39]

Έλεγχος

Οι στρατηγικές ελέγχου του Wave Dragon είναι δύο. Η μια επικεντρώνεται στη ρύθμιση του ύψους της συσκευής που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και η δεύτερη στη δέσμευση όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας από τα κύματα.

Τα τμήματα που βρίσκονται πάνω και κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ρυθμίζονται κατάλληλα από ένα σύστημα με αέρα υπό πίεση που είναι τοποθετημένο στο κάτω τμήμα της δεξαμενής. Με αυτό τον τρόπο το ύψος της κατασκευής που βρίσκεται έξω από το νερό ρυθμίζεται ώστε ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες να επιτυγχάνεται η υψηλότερη απόδοση. Ο τρόπος με τον οποίο ρυθμίζεται το ύψος απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή γιατί μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητα της συσκευής.

Η δέσμευση της ενέργειας από τα κύματα εξαρτάται από την ποσότητα του νερού που βρίσκεται εντός της δεξαμενής. Αν η στάθμη του νερού στη δεξαμενή είναι υψηλή τότε τα κύματα που θα υπερπηδήσουν τη ράμπα δε θα αποθηκευτούν στη δεξαμενή και θα έχουμε υπερχειλίση. Αν η στάθμη του νερού είναι χαμηλή, τότε το υδροδυναμικό ύψος στο στρόβιλο θα είναι και αυτό χαμηλό και κατά συνέπεια η ισχύς που θα παραχθεί θα είναι μειωμένη. Γι' αυτό λοιπόν είναι απαραίτητο να βρεθεί η ιδανική στάθμη νερού στη δεξαμενή η οποία βελτιστοποιεί την απόδοση. Σύμφωνα με μελέτες οι οποίες έχουν διεξαχθεί, η ύπαρξη της κατάλληλης ποσότητας νερού στη δεξαμενή μπορεί να αυξήσει την απόδοση από 5-10%. [11],[39]

Περιβάλλον

Τα αποτελέσματα από μελέτες που έχουν γίνει για την εύρεση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του Wave Dragon ήταν θετικά ακόμη και σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας. Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η συσκευή είναι τα εξής :

- ♦ Πολύ μικρή ορατότητα της κατασκευής. Το Wave Dragon μοιάζει με αγκυροβολημένο πλοίο με ύψος το πολύ 7 μέτρων έξω από το νερό.
- ♦ Μικρό «αποτύπωμα» στο βυθό της θάλασσας. Τα μόνα τμήματα που εγκαθίστανται στον πυθμένα είναι οι άγκυρες πρόσδεσης και το καλώδιο ισχύος.
- ♦ Σχεδόν αθόρυβη λειτουργία.
- ♦ Δεν υπάρχει κίνδυνος διαρροής. Όλα τα υδραυλικά λάδια της κατασκευής έχουν αντικατασταθεί με υδραυλικά νερού, ενώ δεν χρησιμοποιείται τοξικό αντιρρυπαντικό.[39]

Πλεονεκτήματα Wave Dragon

- Το σύστημα Wave Dragon συνδυάζει την υπάρχουσα και ανεπτυγμένη τεχνολογία υδροστροβίλων.
- Είναι ο μοναδικός μετατροπέας κυματικής ενέργειας ανοιχτής θαλάσσης υπό ανάπτυξη, ο οποίος μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε κλίμακα μεγέθους χωρίς περιορισμούς.
- Εξαιτίας του μεγάλου του μεγέθους, το σέρβις, η συντήρηση και κάποιες αρκετά σημαντικές επισκευές μπορούν να πραγματοποιηθούν επί τόπου μειώνοντας έτσι το κόστος συντήρησης σε σχέση με άλλους μετατροπείς. Η κατασκευή του είναι σχετικά απλή και τα μόνα κινητά μέρη του είναι οι στρόβιλοι. Συνεπώς πρόκειται για μια ιδιαίτερα αξιόπιστη κατασκευή. [39]

5.3. Τεχνολογία Σημειακού Απορροφητή

5.3.1.AWS (Archimedes Wave Swing)

Το AWS είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας τύπου σημειακού απορροφητή (το χαρακτηριστικό μήκος, σε αυτή τη περίπτωση η διάμετρος, είναι μικρότερο σε σχέση με το μήκος κύματος)

Το Archimedes Wave Swing είναι ένας ιδιαίτερος μετατροπέας κυματικής ενέργειας μιας και βρίσκεται εξολοκλήρου υποθαλάσσια. Χάρη σε αυτό είναι λιγότερο ευπρόσβλητος από τα ακραία καιρικά φαινόμενα, ενώ παράλληλα δε προκαλεί οπτική ρύπανση μιας και δεν είναι ορατός.

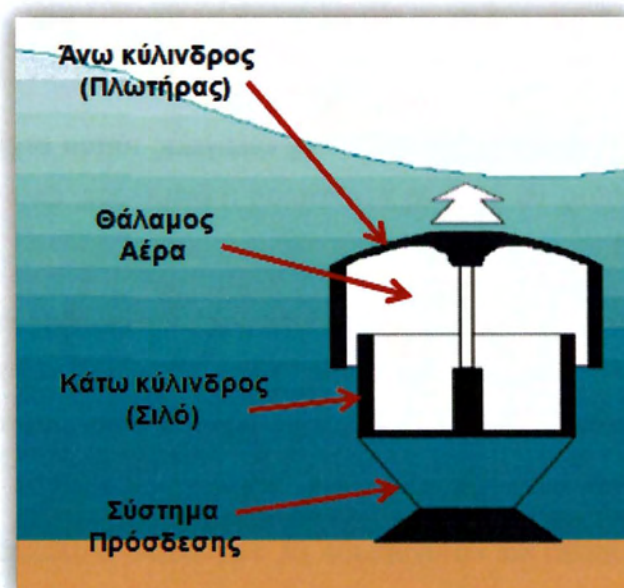
Το AWS έχει εφευρεθεί και κατοχυρωθεί με παγκόσμιο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Fred Gardner. Το πρόγραμμα ανάπτυξης της συσκευής ανέλαβε η Δανέζικη εταιρεία Teamwork Tech. BV το 1994.

Το Νοέμβριο του 2001 έγινε η πρώτη απόπειρα δοκιμής της συσκευής σε ακτή της Πορτογαλίας, αλλά λόγω προβλημάτων σταθερότητας η δοκιμή διακόπηκε. Έπειτα από περεταίρω μελέτη το 2004 διεξήχθησαν εκ νέου δοκιμές στην ανοιχτή θάλασσα για διάφορες κυματικές συνθήκες με τη βοήθεια ξεχωριστών τεχνικών που είχαν αναπτυχθεί, και ήταν επιτυχείς.

Στις δοκιμές του πρωτοτύπου χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω εξοπλισμός για τη διευκόλυνση της διαδικασίας βύθισης της συσκευής ο οποίος δε προβλέπεται στην μετέπειτα εμπορική χρήση του AWS. [41]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το AWS έχει ως αρχή λειτουργίας του τη διαφορική πίεση. Αποτελείται από δύο κυλίνδρους τοποθετημένους ο ένας μέσα στον άλλον. Ο ένας κύλινδρος (κάτω κύλινδρος - σιλό) είναι προσδεμένος σταθερά από τη μια του άκρη στον πυθμένα της θάλασσας και στο άνω τμήμα του έχει άνοιγμα. Ο δεύτερος (άνω κύλινδρος - πλωτήρας) είναι τοποθετημένος στο επάνω μέρος του προαναφερθέντος κυλίνδρου σφραγίζοντας το άνοιγμά του. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένας αεροστεγής θάλαμος αέρα μεταξύ των δύο κυλίνδρων. Στην εικόνα 5.17 φαίνεται σχηματικά η διάταξη του AWS



Εικόνα 5.17 : Σχηματική διάταξη του AWS [1]

Ο πλωτήρας (άνω κύλινδρος) μπορεί να κινηθεί είτε προς το κάτω όταν διέρχεται η κορυφή ενός κύματος, συμπιέζοντας έτσι τον αέρα που βρίσκεται στον θάλαμο, είτε προς τα επάνω όταν διέρχεται η κοιλάδα ενός κύματος αποσυμπιέζοντας τον αέρα του θαλάμου. Με αυτό τον τρόπο η συσκευή συντονίζεται με τη συχνότητα των κυμάτων. Αυτή η ταλάντωση με τη χρήση μιας ειδικά σχεδιασμένης ηλεκτρογεννήτριας μόνιμων μαγνητών μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. [11]

Περιγραφή	Μήκος (m)	Διάμετρος (m)	Ύψος (m)	Πλάτος (m)	Βάρος (ton)
Πλωτήρας	–	9.5	21	–	400
Σύστημα Βύθισης	48	–	5.5	28	1200

Εικόνα 5.18 : Διαστάσεις AWS [11]

Στην εικόνα 5.19 φαίνεται καθαρά το σύστημα βύθισης το οποίο αποτελείται από τους τέσσερις πυλώνες και την πλωτή εξέδρα, καθώς και η κατασκευή καθοδήγησης του πλωτήρα. Οι τέσσερις πυλώνες γεμίζουν με νερό για τη βύθιση της συσκευής.



Εικόνα 5.19 : Πρωτότυπο AWS στο λιμάνι Leixões (Πορτογαλία) το 2004 [41]

Η μέγιστη ισχύς εξόδου είναι 2 MW, η μέση ελεύθερη διαδρομή του πλωτήρα είναι 7m και η μέση ταχύτητα είναι 2,2 m/s.

Στη συσκευή έχει τοποθετηθεί ένα σύστημα ασφαλείας το οποίο αποσβένει τη ταλάντωση του πλωτήρα σε περίπτωση σφάλματος της λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας. Αυτό το σύστημα αποτελείται από δύο κυλίνδρους κινούμενους ο ένας μέσα στον άλλο, εξαναγκάζοντας το νερό που βρίσκεται εντός αυτών να διέλθει από μια οπή. Μεταβάλλοντας το εμβαδόν της οπής μπορεί να ρυθμιστεί το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης για την απόσβεση της ταλάντωσης του πλωτήρα. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, το εμβαδόν της οπής παρέμεινε στο ελάχιστο και συνεπώς το πλάτος της ταλάντωσης ήταν μεγάλο. [11],[41]

Το κινητό μέρος της συσκευής ζυγίζει περίπου 400 τόνους, ενώ το συνολικό βάρος της συσκευής περιλαμβανομένου και του συστήματος βύθισης είναι 7.000 τόνοι εκ των οποίων οι 5.000 τόνοι οφείλονται σε ντεπόζιτα γεμάτα άμμο τα οποία χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση, το βύθισμα και την ανάδυση της συσκευής. Ο συνολικός όγκος νερού που μπορεί να αντληθεί και να χρησιμοποιηθεί για το βύθισμα της συσκευής είναι περίπου 1.500 m^3 και επιτρέπει τη ρύθμιση της φυσικής περιόδου της συσκευής σε εύρος από 7 – 13 sec.

Σχεδίαση Ηλεκτρογεννήτριας

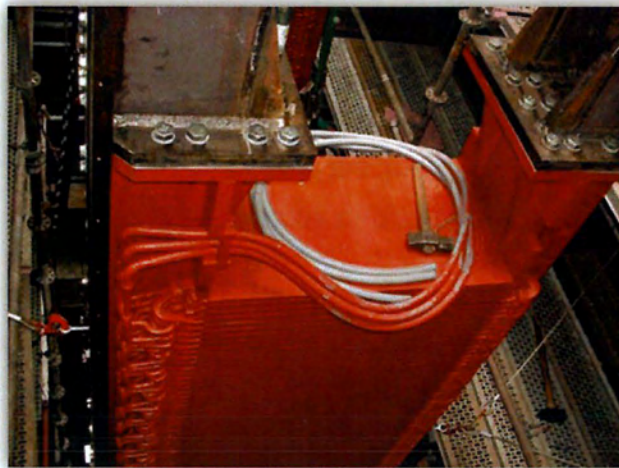
Κατά τη σχεδίαση της ηλεκτρογεννήτριας μόνιμων μαγνητών η οποία χρησιμοποιείται από το AWS λήφθηκαν οι εξής παραδοχές υπόψη :

- Μέγιστη ελεύθερη διαδρομή : 7m
- Μέγιστη ταχύτητα : 2,2m/s
- Μέγιστη αναπτυσσόμενη δύναμη στον πλωτήρα : 1MN
- Στιβαρότητα της κατασκευής
- Αραιά χρονικά διαστήματα συντήρησης
- Υψηλή απόδοση
- Χαμηλό κόστος

Για την ικανοποίηση των σχεδιαστικών απαιτήσεων έγιναν οι παρακάτω σημαντικές επιλογές :

- Η χρήση ενός συστήματος μιας απλής γεννήτριας με ένα σύστημα μετάδοσης το οποίο μετατρέπει τη γραμμική κίνηση του πλωτήρα σε περιστροφική να είναι μια πρωταρχική και οικονομική λύση. Ωστόσο, η κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος που να συνδυάζει παράλληλα στιβαρότητα και ελαχιστοποίηση της συντήρησης είναι δύσκολη. Γι' αυτό και τελικά επιλέχθηκε η χρήση μιας γραμμικής ηλεκτρογεννήτριας μόνιμων μαγνητών.
- Η κατασκευή μιας γεννήτριας αρκετά μεγάλης ώστε να μπορεί να δέχεται όλες τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από τα κύματα, είναι σχεδόν αδύνατη και πολυδάπανη. Με τη χρήση όμως του συστήματος απόσβεσης μπορούν και απορροφώνται οι μεγάλες δυνάμεις. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα της επιλογής γεννήτριας η οποία μπορεί να συνδυάσει υψηλή απόδοση με σχετικά χαμηλό κόστος.

- Η γραμμική ηλεκτρογεννήτρια η οποία μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική είναι μια γεννήτρια μόνιμων μαγνητών και χρησιμοποιείται λόγω της υψηλής απόδοσής της στις χαμηλές στροφές.
- Η χρησιμοποιούμενη γεννήτρια είναι επίπεδη λόγω του χαμηλού κόστους που προσφέρει.
- Οι μαγνήτες είναι κουμπωτοί ώστε να μειωθεί ο αριθμός των συνδέσεων.
- Για τη ψύξη του στάτορα έχει εγκατασταθεί σύστημα υδρόψυξης
- Ο μετατροπέας ισχύος για τη τροφοδότηση του δικτύου είναι τοποθετημένος στην ακτή, ώστε τυχόν προβλήματα που παρουσιάσει να μπορούν να επιλυθούν σύντομα. Ένα καλώδιο μήκους 6km συνδέει τις γεννήτριες όλων των μονάδων AWS με τον μετατροπέα ισχύος στην ακτή.
- Για τη τροφοδότηση του δικτύου στην ακτή χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ρεύματος (current inverter). Ένας μετατροπέας τάσης (voltage inverter) έχει περισσότερα πλεονεκτήματα, όπως καλύτερο έλεγχο και υψηλότερη απόδοση. Όμως έχει διαπιστωθεί ότι ο μετατροπέας ρεύματος είναι προσηγορότερος και οικονομικότερος στην εφαρμογή.



Εικόνα 5.20 : Στάτορας του AWS [11]

Πλεονεκτήματα

- Το AWS είναι βυθισμένο τουλάχιστον 6 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και με αυτό τον τρόπο αποφεύγει τυχόν θύελλες που θα οδηγούσαν στην καταπόνηση και φθορά της συσκευής. Κάτι τέτοιο μειώνει παράλληλα το κόστος πρόσδεσης.

- Το AWS έχει ένα μόνο βασικό κινούμενο τμήμα και περιορισμένα βοηθητικά που μειώνουν τον κίνδυνο αποτυχίας και τις απαιτήσεις συντήρησης.
- Το AWS έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εφικτή η επί τόπου συντήρησή του σε όλες σχεδόν τις καιρικές συνθήκες. Αυτό σημαίνει ότι ενώ κάποιες συσκευές στην επιφάνεια της θάλασσας θα έχαναν εβδομάδες παραγωγικής λειτουργίας, το AWS μπορεί να τεθεί ξανά σε λειτουργία μέσα σε μία μέρα.
- Το AWS δεν έχει οπτικές επιπτώσεις για το περιβάλλον αφού βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού

5.3.2. Wavestar

Η φιλοσοφία λειτουργίας της εν λόγω κατασκευής επινοήθηκε το 2000 από τους λάτρεις της ιστιοπλοΐας Niels Hansen και Keld. Η σκέψη ήταν να δημιουργηθεί μία μηχανή η οποία να εξασφαλίζει ομαλή παραγωγή ενέργειας από τα κύματα του ωκεανού τα οποία δημιουργούν σε κάθε θέση περιοδική άνοδο και κάθοδο νερού ανά 5-10 δευτερόλεπτα.

Ο μετατροπέας έχει σχεδιασθεί για να εγκαθίσταται σε αποστάσεις 10 – 20 Km από την ακτή.

Τον Δεκέμβριο του 2011 οι εταιρείες DONG Energy A / S και Wave Star A / S υπέγραψαν συμφωνία συνεργασίας για έρευνα και ανάπτυξη με σκοπό τον συνδυασμό αιολικής ενέργειας και ενέργειας από τα κύματα.

Η Wavestar έχει ήδη αναπτύξει μια μηχανή κυμάτων ισχύος 600 KW που αποτελεί την βάση για την έρευνα των δύο παραπάνω εταιρειών για την προοπτική συνδυασμού των δύο εν λόγω πηγών ενέργειας. [41]

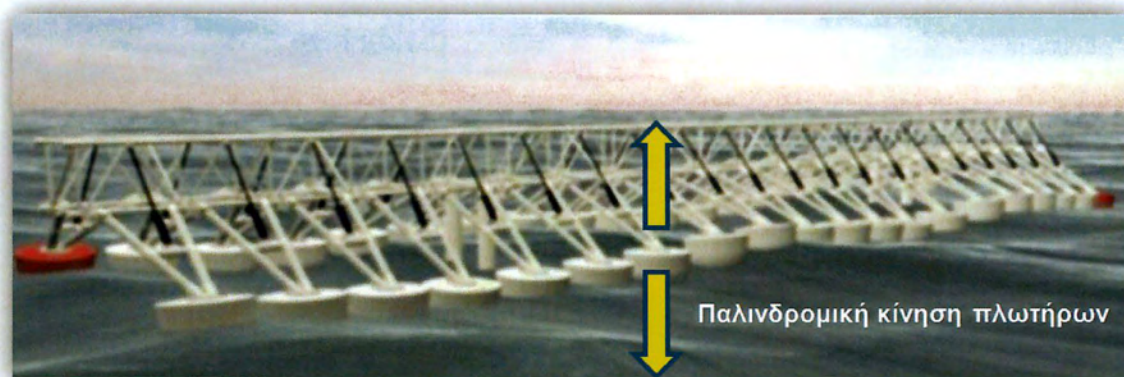


Εικόνα 5.21 : Εγκατάσταση Wavestar στο Helligso Teglvaerk [41]

Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Wavestar ανήκει στις τεχνολογίες κατακόρυφης ταλάντωσης. Η μηχανή περιλαμβάνει μία σειρά από ημιβυθισμένους πλωτήρες οι οποίοι ανεβοκατεβαίνουν, καθώς το κάθε κύμα διέρχεται περιοδικά από την θέση του κάθε πλωτήρα.

Αυτή η εναλλασσόμενη – παλινδρομική μηχανική κίνηση των πλωτήρων μετατρέπεται ακολούθως σε ομαλή συνεχή παραγωγή ενέργειας. [41]



Εικόνα 5.22 : κίνηση πλωτήρων του Wavestar [42]

Ο πατενταρισμένος σχεδιασμός και κατασκευή της όλης εγκατάστασης εξασφαλίζει προστασία του μετατροπέα από ισχυρές θύελλες και καταιγίδες.

Κάθε πλευρά της πλατφόρμας – φορέα περιλαμβάνει 20 ημισφαιρικούς πλωτήρες καθένας από τους οποίους συνδέεται με έναν ιδιαίτερο υδραυλικό κύλινδρο. Το πιστόνι του κυλίνδρου κινούμενο περιοδικά άνω-κάτω συμπιέζει λάδι σε πίεση μέχρι 200 atm σε κοινό σύστημα μετάδοσης. Το σύστημα μετάδοσης με τη σειρά του θέτει σε λειτουργία υδραυλικό κινητήρα ο οποίος εν συνεχεία θέτει σε λειτουργία ηλεκτρογεννήτρια για τη παραγωγή ρεύματος.

Αν υποστούν βλάβη 1 έως και 30 από τα 40 ανεξάρτητα πλωτά συστήματα (75% του συνόλου) η μηχανή μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί με τα υπόλοιπα, με μειωμένη ωστόσο απόδοση.

Η πλατφόρμα έχει διάρκεια ζωής έως 50 έτη.

Ένας γενικός έλεγχος της κατασκευής είναι αναγκαίος ανά 10 έτη και γίνεται με ρυμούλκηση της πλατφόρμας στη στεριά.

Πάνω στην επιπλέουσα πλατφόρμα της μηχανής υπάρχει χώρος κλειστός και στεγανός, απόλυτα προστατευμένος, όπου στεγάζονται η ηλεκτρογεννήτρια, οι ηλεκτρικοί πίνακες, οι υπολογιστές και όλα τα λοιπά τεχνικά μέρη λειτουργίας και ελέγχου της μονάδας.

Η πλατφόρμα με όλο τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό του μετατροπέα συναρμολογείται εξ ολοκλήρου στη στεριά και εν συνεχεία ρυμουλκείται (επιπλέουσα) στην τελική θέση τοποθέτησης της όπου και στερεώνεται πάνω σε μεταλλικούς πυλώνες.

Αν απαιτηθούν μεγάλες επισκευές μπορεί ευχερώς να αποσυνδεθεί από τους πυλώνες της και να ρυμουλκηθεί στη στεριά.



Εικόνα 5.23 : Σύστημα στήριξης του Wavestar [41]

Η πειραματική έρευνα για τον μετατροπέα Wavestar άρχισε το 2004 με τις πρώτες δοκιμές που έγιναν σε εργαστήριο στο Aalborg University της Δανίας, υπό κλίμακα 1: 40.

Ακολούθησαν επιτυχείς δοκιμαστικές εγκαταστάσεις στη θάλασσα σε κλίμακες 1:10 και 1:2 και η πρώτη μηχανή 600 KW συνδέθηκε με το δίκτυο τον Φεβρουάριο του 2010.

Σημαντικό τεχνικό πλεονέκτημα του μετατροπέα είναι η δυνατότητα προσαρμογής του σε μεγάλο εύρος ύψους κυμάτων (0 – 3 m) και περιόδου των κυμάτων (από 2 – 13 sec)

Οι σχετικές αποδόσεις ισχύος (KW) της μηχανής σε ανάλογες συνθήκες ύψους και περιοδικότητας των κυμάτων αναφέρονται στον πίνακα που ακολουθεί [41] :

Πλάτος Κύματος (m)	Περίοδος κύματος (s)										
	2 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13
0.0 - 0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5 - 1.0	0	49	73	85	86	83	78	72	67	63	59
1.0 - 1.5	54	136	193	205	196	182	167	153	142	132	123
1.5 - 2.0	106	265	347	347	322	294	265	244	224	207	193
2.0 - 2.5	175	429	522	499	457	412	372	337	312	288	267
2.5 - 3.0	262	600	600	600	600	540	484	442	399	367	340
3.0 -	Προστασία από καταιγίδα										

Εικόνα 5.24 : Ισχύς του Wavestar για διάφορες συνθήκες ύψους και περιοδικότητας κυμάτων

Πλεονεκτήματα

- Η εγκατάσταση είναι σχετικά ελαφράς κατασκευής και χαμηλού κόστους και η απόδοση της παρόμοια με την απόδοση των ανεμογεννητριών.
- Το κύριο τμήμα της εγκατάστασης ευρίσκεται επάνω από τη στάθμη της θάλασσας και έτσι δεν είναι αναγκαία η χρήση ειδικών και πολύ ακριβών αδιάβροχων υλικών.
- Η εγκατάσταση έχει καλή προστασία έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων και συγκεκριμένα όταν τα κύματα έχουν ύψος μεγαλύτερο από 8 m οι πλωτήρες ανυψώνονται σε θέση 20 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Η μηχανή μπορεί να λειτουργεί ακόμη και με πολύ μικρά κύματα ύψους 10 cm και επίσης παράγει ενέργεια στο 90% του χρόνου και με μέγιστη ισχύ στο 30% του χρόνου.

5.3.3. AquaBuoy

Ο μετατροπέας κυμάτων AquaBuOY επινοήθηκε από την εταιρεία AquaEnergy Group Ltd και εν συνεχεία αναπτύχθηκε από την εταιρεία Finavera Renewables η οποία εξαγόρασε τα σχετικά δικαιώματα το 2006. Μικρό μόνο μέρος της κατασκευής βρίσκεται επάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και τοποθετείται αρκετά μίλια από τις ακτές.[43]

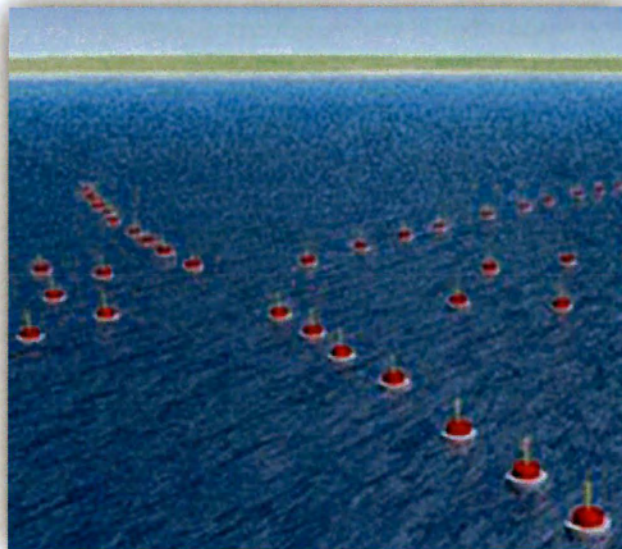
Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Η λειτουργία της βασικής μονάδας AquaBuOY βασίζεται στην τεχνολογία μεμονωμένου πλωτήρα, ο οποίος μέσω αρθρωτών συστημάτων μετατρέπει την περιοδική άνω-κάτω κίνηση της θάλασσας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Αρχικά η κινητική ενέργεια από την κατακόρυφη κίνηση του κύματος μετατρέπεται σε ενέργεια θαλασσινού νερού υπό πίεση μέσω αντλιών διπλής ενέργειας τύπου εύκαμπτου σωλήνα. Ακολούθως το θαλασσινό νερό υπό πίεση οδηγείται σε σύστημα μετατροπής που περιλαμβάνει στρόβιλο, ο οποίος με την σειρά του θέτει σε λειτουργία μια ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πολλές όμοιες μονάδες διασυνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα ενιαίο σύνολο – συστοιχία που εγκαθίσταται σε απόσταση αρκετών μιλίων από την ακτή, όπου η κυματική ενέργεια είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Μια συστοιχία των AquaBuOys ανάλογα με το πλήθος των μηχανών μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από μερικές εκατοντάδες KW μέχρι μερικές εκατοντάδες MW.[43]



Εικόνα 5.25 : συστοιχία AquabuOys[43]



Εικόνα 5.26 : Μονάδα AquaBuOY με ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά πάνελς[43]

Η ηλεκτρική ισχύς μεταφέρεται στη στεριά με υποθαλάσσια ηλεκτρική γραμμή μεταφοράς.

Η μηχανή περιλαμβάνει τέσσερα στοιχεία :

- ♦ Κύριο πλωτήρα
- ♦ Σωλήνα κίνησης – επιτάχυνσης του νερού
- ♦ Έμβολο
- ♦ Αντλία τύπου ελαστικού σωλήνα συμπίεσης

Ο κύριος πλωτήρας επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας και ακολουθεί την περιοδική άνω-κάτω κίνηση των κυμάτων.

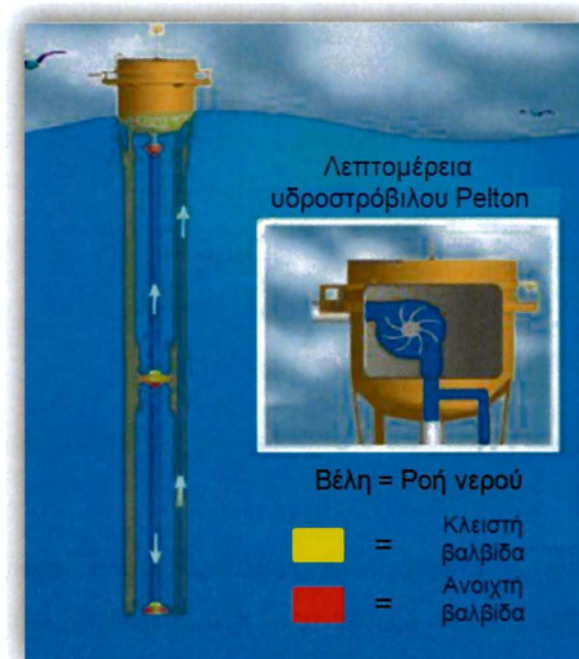
Ο σωλήνας κίνησης – επιτάχυνσης του θαλασσίου νερού είναι ένας κύλινδρος στερεωμένος κατακόρυφα στο κάτω μέρος του πλωτήρα, ο οποίος είναι ανοικτός στα δύο άκρα με τρόπο ώστε να επιτρέπει την ελεύθερη είσοδο και έξοδο του νερού και προς τις δύο διευθύνσεις (άνω-κάτω).

Το έμβολο είναι ένας πλατύς δίσκος - πλωτήρας ουδέτερης πλευστότητας ο οποίος τοποθετείται στο μέσο του σωλήνα επιτάχυνσης.

Όταν ο κύριος πλωτήρας ηρεμεί (θάλασσα σε ηρεμία) το έμβολο διατηρείται ακίνητο στο μέσο του σωλήνα επιτάχυνσης, λόγω της ισορροπημένης κατάστασης έντασης των δύο αντλιών τύπου ελαστικού σωλήνα που είναι στερεωμένες στο επάνω και το κάτω μέρος του εμβόλου.

Η κάθε αντλία τύπου ελαστικού σωλήνα είναι ουσιαστικά ένας σωλήνας από ειδικό ελαστικό υλικό ενισχυμένο με χάλυβα, ο εσωτερικός όγκος του οποίου μειώνεται όταν ο σωλήνας τεντώνεται (και κατά συνέπεια στενεύει η διατομή του) με αποτέλεσμα το νερό να βγαίνει από τον σωλήνα με υψηλή πίεση και να οδηγείται σε στρόβιλο Pelton ο οποίος με τη σειρά του κινεί μια ηλεκτρογεννήτρια.

Με την περιοδική – συνεχή κίνηση του κύριου πλωτήρα άνω-κάτω το παραπάνω ζεύγος των αντλιών τύπου «ελαστικού σωλήνα» τροφοδοτεί τον στρόβιλο με συνεχή ροή θαλασσινού νερού υπό υψηλή πίεση.



Εικόνα 5.27 : Σχηματική λειτουργία του AquaBuoy [44]

Πλεονεκτήματα

- Το σύστημα είναι ευέλικτο όσον αφορά την συγκρότηση του διότι μπορεί να περιλαμβάνει όσον αριθμό μεμονωμένων μονάδων είναι αναγκαίος, ανάλογα με το μέγεθος ισχύος της εγκατάστασης που είναι επιθυμητό.
- Η σύνθεση του συστήματος περιλαμβάνει μέρη που ήδη χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε πολλά άλλα συστήματα σε όλο τον κόσμο.
- Η τεχνολογία του, τύπου επιπλέοντος πλωτήρα, εξασφαλίζει την επιβίωση του σε περίπτωση πολύ μεγάλων κυμάτων, ή ακόμα και τσουνάμι, σε σύγκριση με τα παράκτια συστήματα.
- Είναι σχεδιασμένο για πλήρη απόδοση σε μέτριες κυματικές συνθήκες.

5.4. Τεχνολογία Αρθρώσεων

5.4.1. Pelamis

Το Pelamis είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που τοποθετείται υπεράκτια σε βάθος μεγαλύτερο των 50m περίπου 2 – 10km από την ακτή. Η ισχύς εξόδου του εκτιμάται στα 750kW με έναν συντελεστή 25 – 40%, ανάλογα με την περιοχή

τοποθέτησης της συσκευής. Ένας μετατροπέας μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια περίπου 500 κατοικιών.

Από το 1998 η Pelamis Wave Power Ltd (PWP) είναι η υπεύθυνη εταιρεία για την ανάπτυξη της συσκευής. Σήμερα πάνω από 70 εξειδικευμένα άτομα εργάζονται καθημερινά σε διαφορετικές περιοχές με σκοπό τη περαιτέρω ανάπτυξη της συσκευής ώστε να την καταστήσουν ως τον κυρίαρχο μετατροπέα κυματικής ενέργειας στην αγορά.

Το πρωτότυπο Pelamis πλήρους κλίμακας δοκιμάστηκε στο European Marine Energy Centre από το 2004 – 2007. Είχε μήκος 120m, διάμετρο 3.5m και αποτελούντο από 4 τμήματα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών της συσκευής επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το υπολογιστικό μοντέλο. Επίσης αποτέλεσε και τον πρώτο υπεράκτιο μετατροπέα κυματικής ενέργειας ο οποίος τροφοδότησε το εθνικό δίκτυο με ηλεκτρική ενέργεια. Η Pelamis Wave Power έχει κατασκευάσει έξι συσκευές πλήρους κλίμακας για την E.ON και την ScottishPower Renewables.[45]



Εικόνα 5.28 : Pelamis (P2) 2^{ης} γενιάς [45]

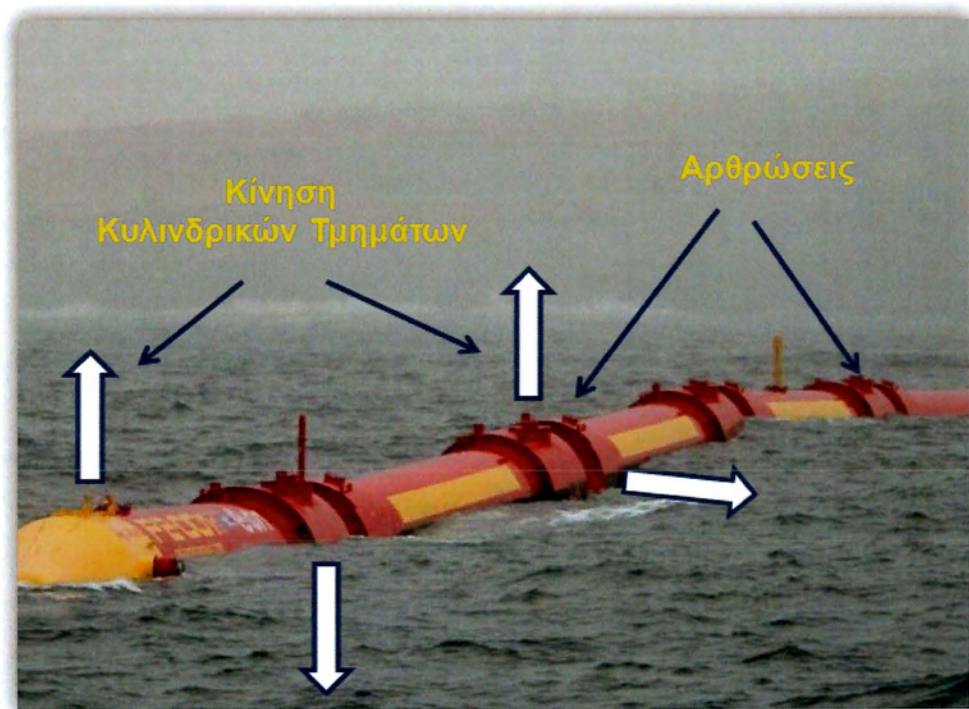
Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία

Το Pelamis είναι ένας ημιβυθισμένος μετατροπέας κυματικής ενέργειας που τοποθετείται στην επιφάνεια της θάλασσας. Αποτελείται από πέντε κυλινδρικά τμήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα με ειδικά διαμορφωμένες αρθρώσεις. Οι αρθρώσεις επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση των τμημάτων σε δύο διευθύνσεις. Καθώς τα κύματα διέρχονται από τη συσκευή, τα κυλινδρικά τμήματα ταλαντώνονται και έτσι οι αρθρώσεις κάμπτονται. Αυτή η κίνηση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός υδραυλικού συστήματος με έμβολα που είναι τοποθετημένο εντός των αρθρώσεων. Κάθε υδραυλικό σύστημα λειτουργεί ανεξάρτητο από αυτά των υπόλοιπων αρθρώσεων. Η κίνηση των αρθρώσεων αντισταθμίζεται από τα έμβολα τα οποία αντλούν λάδι σε υψηλή πίεση και το οδηγούν σε υδραυλικά μοτέρ. Τα μοτέρ είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρογεννήτριες οι οποίες με τη σειρά τους παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγόμενη ενέργεια μεταβιβάζεται στην

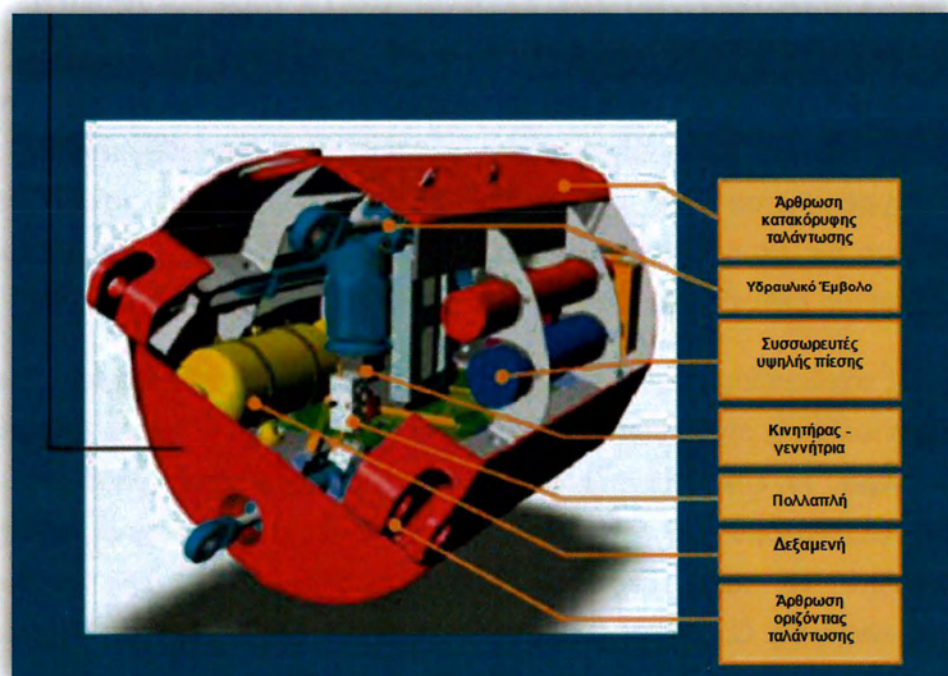
ακτή μέσω υποθαλάσσιων καλωδιώσεων. Για την αύξηση της συνολικής ηλεκτρικής ισχύς είναι εφικτή η σύνδεση πολλών Pelamis μαζί.[11],[45]

Μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του Pelamis είναι τα παρακάτω :

- ♦ Μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα βάθη, σε υπεράκτιες θαλάσσιες περιοχές, ανεξαρτήτως από τη διαμόρφωση του πυθμένα. Αυτό διευκολύνει την επιλογή που θα γίνει η τοποθέτηση.
- ♦ Η κατασκευή του γίνεται εξολοκλήρου στην ακτή ελαχιστοποιώντας έτσι τις επιπλέον εργασίες που πρέπει να γίνουν στη θάλασσα καθώς και το κόστος των υπεράκτιων εγκαταστάσεων.
- ♦ Η συναρμολόγηση / αποσυναρμολόγηση του συστήματος πρόσδεσης και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού είναι ταχύτατη και έτσι η μεταφορά του Pelamis στην ακτή και η συντήρησή του μπορούν να γίνουν σε μικρό χρονικό διάστημα.
- ♦ Η μονάδα έχει σύστημα ελέγχου που προσαρμόζει την απόδοση της ανάλογα με τις συνθήκες των θαλασσίων κυμάτων.



Εικόνα 5.29 : Κινήσεις του Pelamis[45]



Εικόνα 5.30 : Κατασκευαστικά στοιχεία μονάδας Pelamis[46]



Εικόνα 5.31 : Τρόπος μεταφοράς μονάδας Pelamis[46]

6. Υπολογισμοί στην παλλόμενη στήλη ύδατος (OWC)

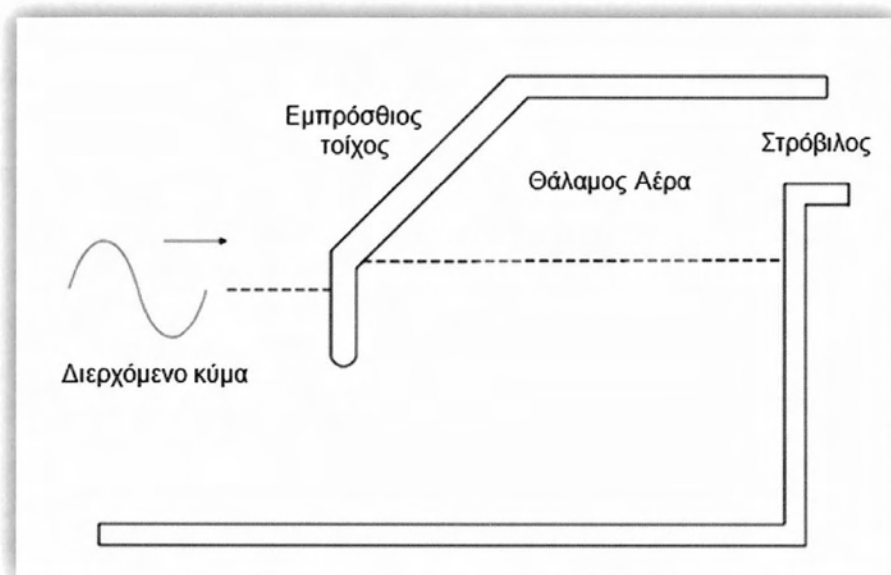
Οι κατασκευές που αξιοποιούν μια ταλαντευόμενη στήλη νερού (OWC) αποτελούν μία κατηγορία κατασκευών – μηχανισμών, η οποία έχει αποδεδειγμένα τη μεγαλύτερη ανάπτυξη σε εγκαταστάσεις μεγάλου εύρους με πιο γνωστές αυτές στα νησιά Islay στην δυτική ακτή της Σκωτίας και στα νησιά Azores. Τα περισσότερα από τα συστήματα με ταλαντευόμενη στήλη νερού (OWCs) είναι εγκατεστημένα στην ξηρά.

Ο γενικός σχεδιασμός μιας μονάδας η οποία εγκαθίσταται σε ακτογραμμή και αξιοποιεί την ταλαντευόμενη στήλη ύδατος (OWC), παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1. Όπως έχουμε προαναφέρει, τα επερχόμενα κύματα προκαλούν στον αέρα μέσα στον εσωτερικό κλειστό αεροθάλαμο (air chamber) μια χρονικά μεταβαλλόμενη πίεση η οποία μετατρέπεται σε ισχύ μέσω ενός αεροστροβίλου και μιας διασυνδεδεμένης ηλεκτρογεννήτριας. Ο αεροστρόβιλος τίθεται σε κίνηση και στρέφεται πάντα κατά την ίδια φορά (στρόβιλος Wells), από τη διαφορά πίεσης που αναπτύσσεται στα άκρα του τόσο κατά την προσέλευση του κύματος (εισπνοή αέρα στον στρόβιλο) όσον και κατά την απόσυρση του κύματος (εκπνοή αέρα από τον στρόβιλο).

Πριν αναπτύξουμε τεχνικές και μοντέλα για την άντληση της ισχύος θα μελετήσουμε το σύστημα της ταλαντούμενης στήλης ύδατος που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1 από τη σκοπιά της υδροδυναμικής.

Κατ' αρχήν το σχήμα και το πάχος του εμπρός τοίχου πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να είναι ανθεκτικό έναντι των έντονων καιρικών συνθηκών και ιδιαίτερα έναντι των ισχυρών κυμάτων που θα τον προσβάλουν. Το νερό που απορρέει από το χείλος συνήθως προκαλεί τυρβώδη ροή ή ακόμα και κυκλικό κύμα στην περιοχή του μετώπου προσβολής του τοίχου από το επόμενο κύμα. Σε γενικές γραμμές η προσβολή της κατασκευής από τα κύματα δεν είναι ομαλή και ανάλογα μη στρωτή και μη ομαλή είναι η πίεση που αναπτύσσεται μέσα στον αεροθάλαμο. Αν και η βασική αρχή λειτουργίας μιας ταλαντευόμενης στήλης νερού (OWC) φαίνεται να είναι απλή, η κατασκευή ενός καλού μοντέλου που να περιγράφει την εν λόγω λειτουργία είναι αρκετά σύνθετη.

Η μοντελοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του φαινομένου είναι δυσχερής και απαιτεί προχωρημένες αριθμητικές τεχνικές. Η επιρροή ιξώδους και κατάστασης στροβιλισμού συνεξετάζονται μέσω ενός τριδιάστατου μοντέλου “Κ-ε”. Για απλοποίηση των υπολογισμών η θεωρητική ανάλυση γίνεται για διδιάστατα μοντέλα, δηλαδή εν προκειμένω θεωρώντας πολύ μεγάλο το μήκος της κατασκευής στην ακτογραμμή. [11]

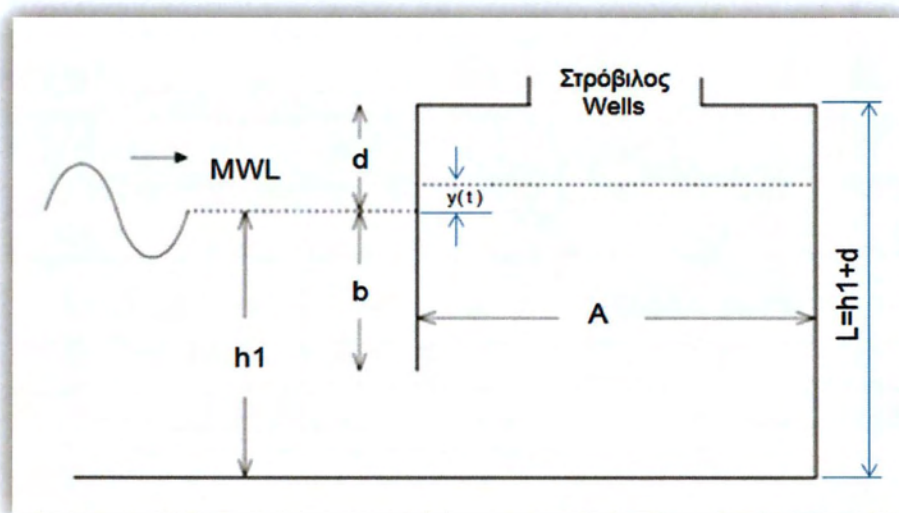


Εικόνα 6.1 : Κατακόρυφη τομή μιας παράκτιας μονάδας OWC [11]

Μια μεγάλη δυσκολία είναι να εκτελεσθούν πειραματικές μελέτες σε πραγματικές μονάδες OWC. Η μελέτη των υδροδυναμικών και πνευματικών ροών απαιτεί μοντέλα σε μικρότερες κλίμακες και δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για την επιρροή των πραγματικών δημιουργούμενων στροβίλων στο νερό, από την απορροή του νερού του προηγούμενου κύματος, από τα μοντέλα μικρής κλίμακας. Το γεγονός αυτό καθιστά την αριθμητική και μαθηματική μοντελοποίηση ιδιαίτερα χρήσιμο και πολύτιμο εργαλείο έρευνας. Για περισσότερη ευκολία επίσης τα υπάρχοντα μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα όπου τα σχετικά φαινόμενα μελετώνται είτε σε συνάρτηση με την συχνότητα του κύματος (f) είτε σε συνάρτηση με τον χρόνο (t).

Στη παρακάτω μελέτη χρησιμοποιούμε το μαθηματικό μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από τους Iain G. Morrison και Clive A. Greaved με σκοπό την εξαγωγή απλών υπολογισμών σε μια στήλη ύδατος και σύγκριση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων με αυτών της βιβλιογραφίας για υπάρχοντα συστήματα παραπλήσιου μεγέθους.

Αντί για το πραγματικό σχέδιο κατασκευής μιας μονάδας OWC που απεικονίζεται στην εικόνα 6.1, για την απλοποίηση του προβλήματος και την θεωρητική μελέτη του συστήματος χρησιμοποιούμε ένα διδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης, όπως αυτό παρουσιάζεται στην εικόνα 6.2.



Εικόνα 6.2 : Θεωρητικό μοντέλο παράκτιας μονάδας OWC [47]

Υπάρχουν δύο κύριες διαφορές μεταξύ πραγματικής κατασκευής (εικόνα 6.1) και θεωρητικού μοντέλου (εικόνα 6.2) :

1. Η πρώτη διαφορά αφορά την θέση τοποθέτησης του στροβίλου ο οποίος στην πραγματική κατασκευή της εικόνας 6.1 τοποθετείται στο πίσω μέρος της κατασκευής ενώ στο θεωρητικό μοντέλο της εικόνας 6.2 τοποθετείται στην οροφή. Επίσης στην πραγματικότητα το εμπρόσθιο τοίχιο έχει μεγάλο πάχος για να αντέχει στην προσβολή από τα κύματα, ενώ στο θεωρητικό μοντέλο υποθέτουμε ότι έχει αμελητέο πάχος.
2. Η δεύτερη διαφορά αφορά το εμπρόσθιο τοίχιο το οποίο στην πραγματική κατασκευή στην εικόνα 6.1 είναι επικλινές ενώ στο θεωρητικό μοντέλο στην εικόνα 6.2 είναι κατακόρυφο.

Η απόκλιση των υπολογισμών από τις πραγματικές συνθήκες, που προκύπτει λόγω των παραπάνω διαφορών μεταξύ πραγματικής κατασκευής και θεωρητικού μοντέλου, δεν είναι εύκολο να αξιολογηθούν. Το μεν πραγματικό πάχος του τοίχου πιθανόν μειώνει την ισχύ που αξιοποιείται από την συσκευή ενώ το επικλινές εμπρόσθιο τοίχιο της πραγματικής κατασκευής βελτιώνει την κυκλοφορία του αέρα στον κλειστό αεροθάλαμο.

Για τα προκαταρκτικά μοντέλα δοκιμών πάντως και οι δύο παραπάνω αποκλίσεις θεωρούνται αποδεκτές.

Το εμφανιζόμενο στην εικόνα 6.2 βασικό μοντέλο σχεδιασμού οφείλεται στον Evans (1982) ο οποίος εισήγαγε και την έννοια της ταλαντούμενης πίεσης στην επιφάνεια του

νερού η οποία με την σειρά της προκαλεί μία ανάλογα μεταβαλλόμενη πίεση στον αέρα πάνω από την επιφάνεια της ταλαντούμενης στήλης νερού (OWC), στο εσωτερικό της συσκευής.

Η αρχική εργασία έγινε σε ένα συγκρότημα μονάδων OWCs και όχι για μια μεμονωμένη μονάδα, όμως εν προκειμένω η εν λόγω έννοια θα εφαρμοσθεί για μια μεμονωμένη συσκευή. [11]

6.1. Υπολογισμός πίεσης και στάθμης νερού στη στήλη

Η θεωρία των “κυμάτων νερού” θεωρεί ότι η αρχική πίεση στην επιφάνεια αέρα-νερού είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση P_a και αυτή λαμβάνεται υπόψη ως σταθερή. Αναφορικά με την εικόνα 6.2 η πίεση του αέρα έξω από τον αεροθάλαμο λαμβάνεται ίση με την ατμοσφαιρική P_a , ενώ η επιφανειακή πίεση στο εσωτερικό του αεροθαλάμου θα έχει μια διαφορετική τιμή η οποία θα είναι μεταβαλλόμενη, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν μέσα στον αεροθάλαμο. Ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης εντός του αεροθαλάμου σε συνάρτηση με τον χρόνο σύμφωνα με τους Iain G. Morrison και Clive A. Greated δίδεται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση [47]:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma p}{d - y} \left[\frac{dy}{dt} - \frac{K}{\rho_o A} \left(\frac{p_o}{p} \right)^{1/\gamma} (p - p_o) \right] \quad (\Sigma 1)$$

Όπου :

- $p = p(t)$: πίεση εντός του θαλάμου
- $y = y(t)$: θέση στάθμης νερού εντός του θαλάμου (εικόνα 6.2)
- t : χρόνος
- d : αρχικό ύψος θαλάμου που περιέχει αέρα (εικόνα 6.2)
- ρ_o : πυκνότητα αέρα
- K : σταθερά η οποία σχετίζεται με το μέγεθος του ανοίγματος τοποθέτησης του στροβίλου
- p_o : ατμοσφαιρική πίεση
- A : Η επιφάνεια διατομής (ανά μονάδα πάχους – διδιάστατο μοντέλο)
- γ : σταθερά των αερίων (C_p/C_v)

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη τόσο τη στατική όσο και τη δυναμική πίεση καθώς και τη κατακόρυφη δύναμη που ασκείται από ένα διερχόμενο κύμα στη στήλη ύδατος, σύμφωνα με τους Iain G. Morriston και Clive A. Greaved προκύπτει η δευτεροβάθμια διαφορική εξίσωση η οποία δίνει το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας του νερού εντός της στήλης κάθε χρονική στιγμή [47]:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{\rho_w(L+y-d)} \left[\rho_w g \left(a \sin(\omega t) - y - \frac{a \sinh[k_1(h_1-b)] * \sin(\omega t)}{k_1(b-h_1) * \cosh(kh)} + \frac{ga^2k_1 * \sinh[2k_1(h_1-b)]}{8\omega^2(b-h_1) * \cosh^2(k_1 * h_1)} \right) + p_o - p \right] \quad (\Sigma 2)$$

Όπου :

- ♦ L : το συνολικό ύψος του θαλάμου (εικόνα 6.2)
- ♦ ρ_w : η πυκνότητα του νερού
- ♦ h_1 : μέση στάθμη της θάλασσας από τον πυθμένα (εικόνα 6.2)
- ♦ b : μήκος χείλους εμπρόσθιου τοιχείου (εικόνα 6.2)
- ♦ a : πλάτος διερχόμενου κύματος
- ♦ k_1 : κυματάριθος του διερχόμενου κύματος
- ♦ ω : η γωνιακή συχνότητα του διερχόμενου κύματος
- ♦ g : σταθερά της βαρύτητας

Οι εξισώσεις (Σ1), (Σ2) επιλύονται αριθμητικά ως σύστημα με τη μέθοδο Runge – Kutta 4^{ης} τάξης.

Αρχικά “σπάμε” τη δευτεροβάθμια εξίσωση (Σ2) σε δύο απλούστερες πρωτοβάθμιες ως εξής :

$$z_2 = y \rightarrow z'_2 = y' = z_3 \rightarrow z'_2 = z_3$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = z'_3 \quad z_1 = p$$

Το τελικό σύστημα λοιπόν με αντικατάσταση διαμορφώνεται ως εξής :

$$z_1' = \frac{\gamma z_1}{d - z_2} \left[z_3 - \frac{K}{\rho_o A} \left(\frac{p_o}{p} \right)^{1/\gamma} (z_1 - p_o) \right] \quad (\Sigma 1)$$

$$z_2' = z_3 \quad (\Sigma 2)$$

$$z_3' = \frac{1}{\rho_w (L + z_2 - d)} \left[\rho_w g \left(\text{asin}(\omega t) - z_2 - \frac{\text{asinh}[k(h_1 - b)] * \sin(\omega t)}{k_1(b - h_1) * \cosh(kh)} \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{ga^2 k_1 * \sinh[2k_1(h_1 - b)]}{8\omega^2(b - h_1) * \cosh^2(k_1 * h_1)} \right) + p_o - z_1 \right] \quad (\Sigma 3)$$

Το φαινόμενο αρχίζει να μελετάται τη στιγμή που η στάθμη του νερού περνά από τη θέση ισορροπίας και ανέρχεται. Οπότε οι αρχικές συνθήκες είναι :

$$Z_1(0) = 101,325 \text{ Kpa} \quad (\text{πίεση})$$

$$Z_2(0) = 0 \text{ m} \quad (\text{στάθμη})$$

$$Z_3(0) = 0.628 \text{ m/s} \quad (\text{ταχύτητα})$$

6.2. Υπολογισμός της ισχύος στον θάλαμο

Έχοντας υπολογίσει τη στάθμη του νερού εντός της στήλης και τη τιμή της πίεσης κάθε χρονική στιγμή σύμφωνα πάλι με τους Iain G. Morrison και Clive A. Greated η ισχύς που περιέχεται στον αέρα υπό πίεση κάθε χρονική στιγμή μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση [47]:

$$P = A \frac{dy}{dt} (p_o - p) \quad (\Sigma 4)$$

6.3. Υπολογισμός παροχής στον στρόβιλο

Για τον αεροθάλαμο υποθέτουμε για ευκολία ένα αυθαίρετο πλάτος W , αλλά το μοντέλο λαμβάνεται υπόψη ως διδιάστατο οπότε είναι αποδεκτή η επιλογή $W = 1$.

Ορίζουμε ως $V_c(t)$ την ποσότητα αέρα στον αεροθάλαμο και ως $V_w(t)$ την ποσότητα νερού στο τμήμα της κατασκευής από το χείλος εισόδου, κάτω από το εμπρός φράγμα μέχρι την επιφάνεια διαχωρισμού νερού – αέρα, μέσα στην στήλη.

Εφαρμόζοντας τα παραπάνω για το μοντέλο της εικόνας 6.2, οι αντίστοιχες εκφράσεις για τα προαναφερθέντα μεγέθη είναι οι $V_c = LH_cW$ και $V_w = LDW$ οπότε σε κάθε χρονική στιγμή θα ισχύει η σχέση [11],[48] :

$$V_w + V_c = L(D + H_c)W \quad (\kappa 1)$$

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις :

$$\frac{dV_w}{dt} = Q(t) = -\frac{dV_c}{dt} \quad (\kappa 2)$$

Όπου :

- * $Q(t)$ = ο όγκος αέρα που εκτοπίζεται από την επιφάνεια της στήλης ύδατος κάθε χρονική στιγμή

Σύμφωνα με τους I. Le Crom, A Brito – Melo, F Neumann και A. Sarmento η παροχή αέρα στον στρόβιλο δίνεται από τη σχέση :

$$Q_t(t) + Q_v(t) = Q(t) - [L(D + H_c)W - V_w(t)] * \frac{1}{\gamma P_\alpha} \frac{dp}{dt} \quad (\kappa 3)$$

Όπου :

- * $Q_t(t)$: η παροχή αέρα στον στρόβιλο
- * $Q_v(t)$: η παροχή αέρα στη βαλβίδα ασφαλείας / εκτόνωσης

Στη περίπτωση μας για απλοποίηση των υπολογισμών θα παραλείψουμε τη παροχή αέρα στη βαλβίδα ασφαλείας, δηλαδή $Q_v(t) = 0$. Κάτι τέτοιο φυσικά θα επηρεάσει τους υπολογισμούς όπως φαίνεται και στη συνέχεια.

Με αντικατάσταση των (κ1),(κ2) στην εξίσωση (κ3) προκύπτει τελικά ότι η παροχή προς τον στρόβιλο είναι ίση με :

$$Q_t(t) = \frac{dV_w}{dt} - \frac{V_c(t)}{\gamma P_a} \frac{dp}{dt} \quad (K4)$$

6.4. Υπολογισμός ισχύος εξόδου στρόβιλου

Η ισχύς εξόδου από τον στρόβιλο δεν παραμένει σταθερή με τον χρόνο και αυτό γιατί ο βαθμός απόδοσης του στρόβιλου εξαρτάται από τη γωνία πρόσκρουσης του αέρα στα πτερύγια η οποία μεταβάλλεται συνεχώς, από τη παροχή προς τον στρόβιλο καθώς και από τη διαφορά πίεσης, μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται επίσης συνεχώς

Ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου για τον δεδομένο στρόβιλο που χρησιμοποιήθηκε εν προκειμένω για κάθε χρονική στιγμή, υπολογίστηκε με τη χρήση της παρακάτω σχέσης [48] :

$$\eta = \frac{P_{εξ.}}{\Delta p Q_t(t)} \rightarrow P_{εξ.} = \eta * \Delta p Q_t(t) \quad (K5)$$

Όπου :

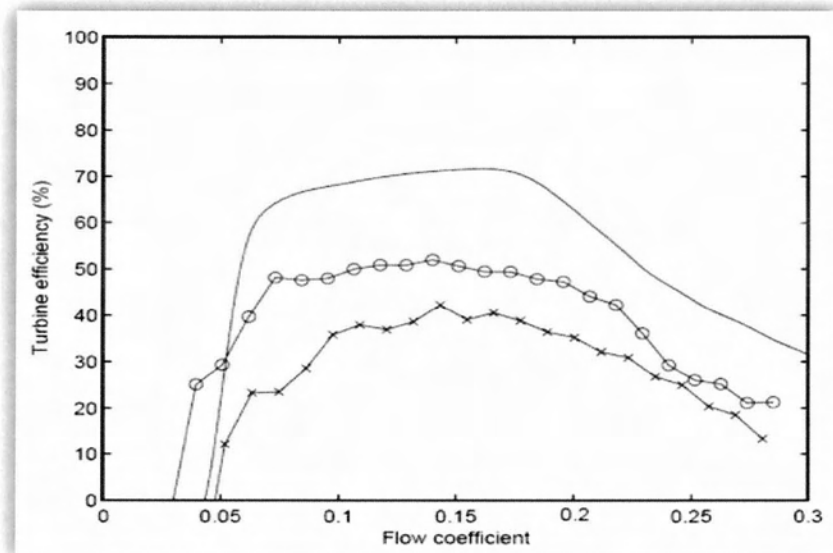
- ♦ η : βαθμός απόδοσης του στρόβιλου
- ♦ $P_{εξ.}$: ισχύς εξόδου
- ♦ Δp : η διαφορά πίεσης στα άκρα του στρόβιλου
- ♦ $Q_t(t)$: η παροχή αέρα στον στρόβιλο

Για την εύρεση του κατάλληλου βαθμού απόδοσης κάθε χρονική στιγμή ανάλογα με τη γωνία πρόσκρουσης του αέρα στα πτερύγια στο πρόγραμμα γίνονται γραμμικές παρεμβολές στο διάγραμμα απόδοσης του στρόβιλου (το οποίο δίνεται από την εταιρεία κατασκευής του) ώστε να βρεθεί ο ανάλογος βαθμός απόδοσης για τη στιγμιαία γωνία ροής που προκύπτει. Οπότε έχοντας υπολογίσει τη πίεση τη παροχή και τον σωστό βαθμό απόδοσης, μπορούμε να υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου κάθε χρονική στιγμή.

6.5. Διαγράμματα και σχολιασμός

Ο στρόβιλος Wells ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς έχει τα παρακάτω στοιχεία :

- ♦ Διάμετρος στροβίλου = 1,5 m
- ♦ Σειρά πτερυγίων = 1
- ♦ Hub to tip ratio = 0.62
- ♦ Αριθμός πτερυγίων = 7
- ♦ Ονομαστική γωνιακή συχνότητα = $101,95 \text{ s}^{-1}$
- ♦ Μήκος χορδής = 0,32 m
- ♦ Τύπος πτερυγίων = NACA0012
- ♦ Γωνία πτερυγίων = 0°



Εικόνα 6.3 : Διάγραμμα απόδοσης του στροβίλου [49]

Η στήλη ύδατος η οποία χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς έχει τα εξής κατασκευαστικά στοιχεία :

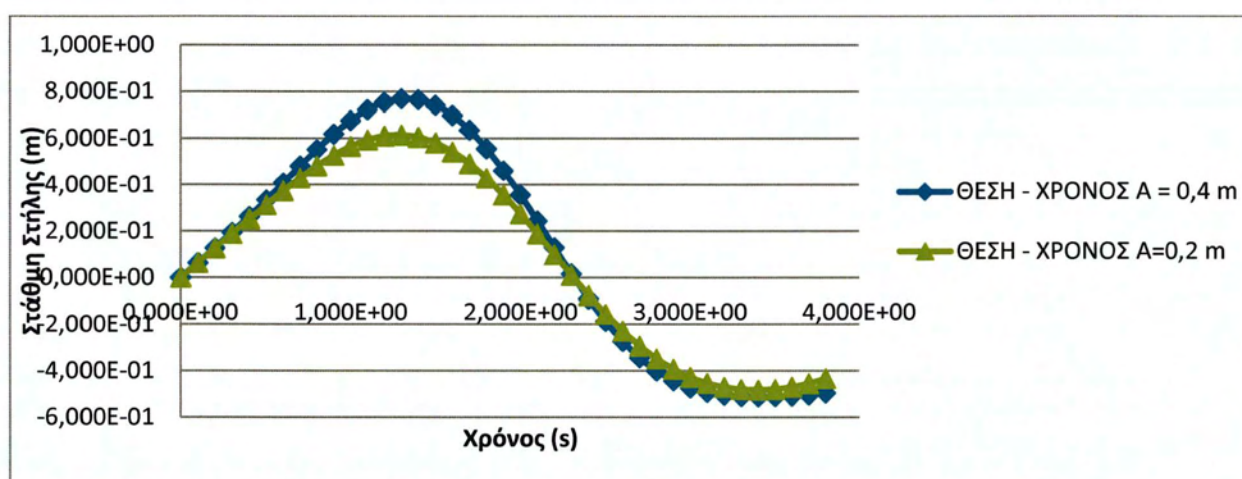
- ♦ Αριθμός θαλάμων = 1
- ♦ $A = 108 \text{ m}^2$
- ♦ $W = 1 \text{ m}$
- ♦ $d = 4 \text{ m}$
- ♦ $h_1 = 5 \text{ m}$
- ♦ $b = 1.5 \text{ m}$
- ♦ $L = h_1 + d = 9 \text{ m}$

Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που διέρχονται προς τη συσκευή είναι τα εξής :

- ♦ Γωνιακή συχνότητα κύματος : $\omega = 2\pi/T = 3,14 \text{ s}^{-1}$
- ♦ Κυματάριθος : $\kappa = 2\pi/\omega T = 1$
- ♦ Πυκνότητα νερού : $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$

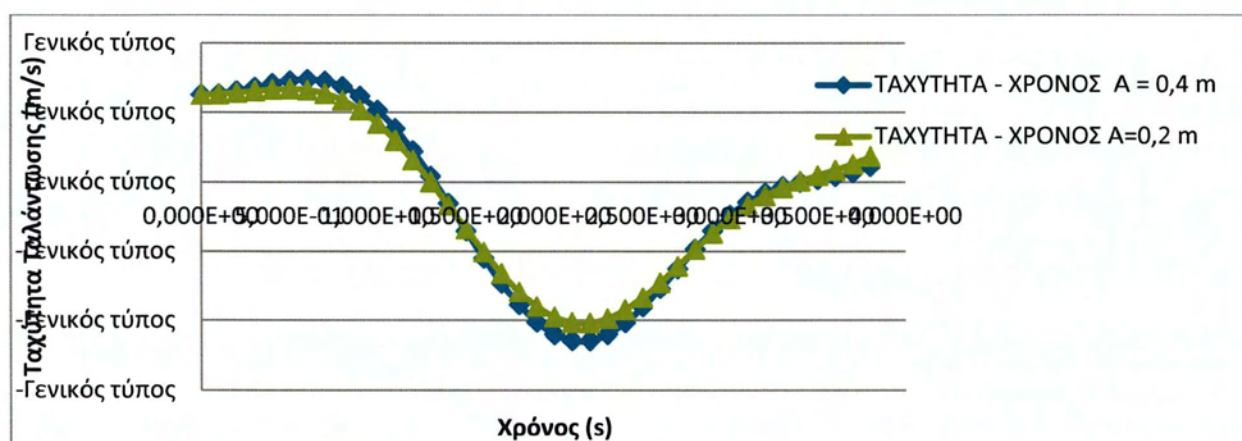
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το πρόγραμμα στα οποία φαίνεται η μεταβολή των διαφόρων φυσικών μεγεθών της στήλης ύδατος συναρτήσει του χρόνου, για πλάτη κύματος :

- ♦ $A = 0,4 \text{ m}$
- ♦ $A = 0,2 \text{ m}$



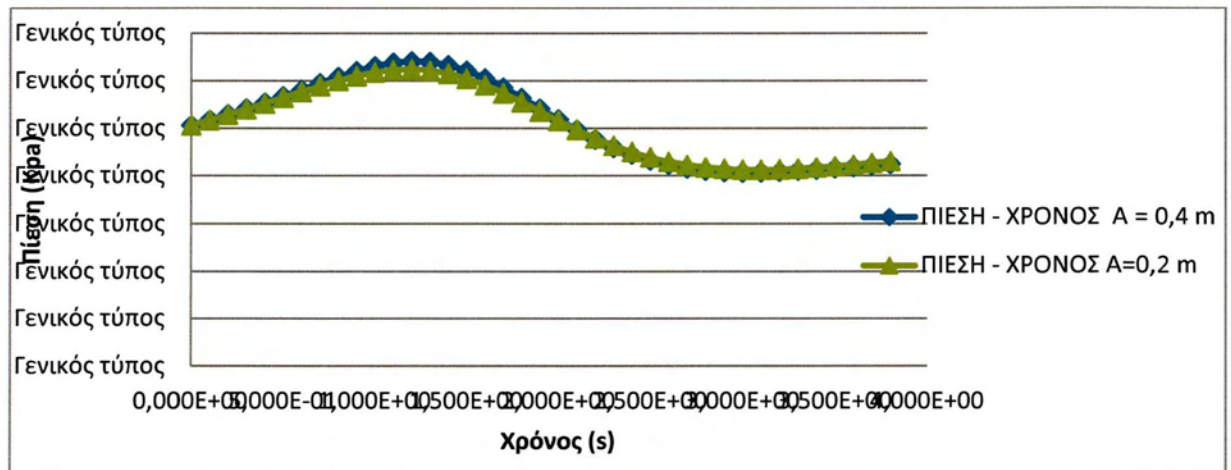
Διάγραμμα 1 : Μεταβολή της στάθμης του νερού στη στήλη συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 1) παρατηρούμε ότι για κύματα με μικρότερο πλάτος, η στήλη ταλαντώνεται αντίστοιχα και αυτή με μικρότερο πλάτος.



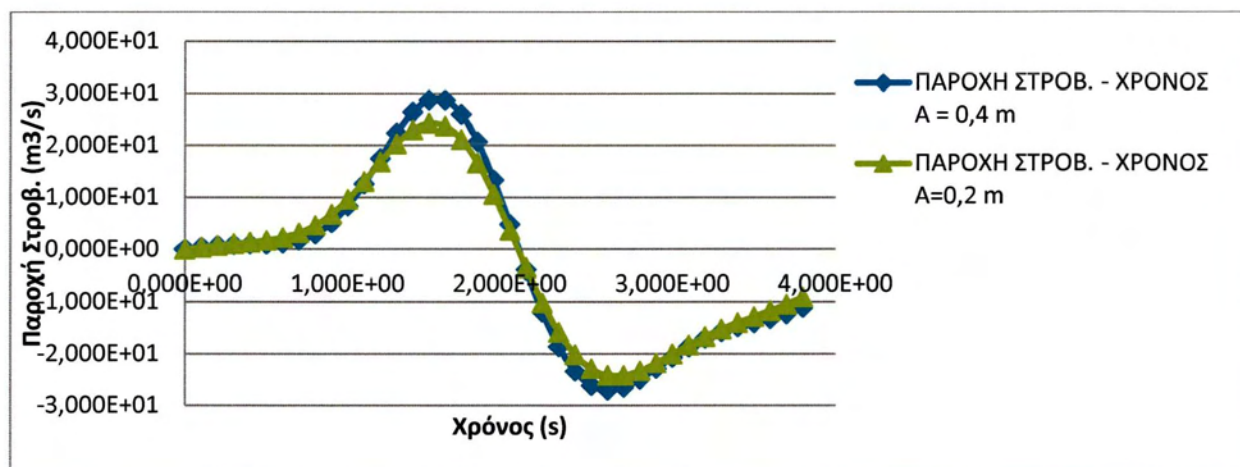
Διάγραμμα 2 : Μεταβολή της ταχύτητας ταλάντωσης της στήλης ύδατος συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα (διάγραμμα 2) φαίνεται ότι για μικρότερο πλάτος των διερχόμενων κυμάτων η στήλη ταλαντώνεται επίσης με μικρότερη ταχύτητα. Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τη χρονική στιγμή $t = 0$ s που η στάθμη του νερού στη στήλη βρίσκεται στη θέση ισορροπίας $x = 0$ m και ανέρχεται, η ταχύτητα είναι σχεδόν μέγιστη και όσο η στήλη ανέρχεται η ταχύτητα μειώνεται.



Διάγραμμα 3 : Μεταβολή της πίεσης του θαλάμου συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η χρονική μεταβολή της πίεσης του θαλάμου συναρτήσει με τον χρόνο. Παρατηρούμε ότι όσο μειώνεται η ταχύτητα 0 – 1,5 s μέχρι να μηδενιστεί για πρώτη φορά, και η στάθμη του νερού ανυψώνεται, η πίεση εντός του θαλάμου αυξάνει, κάτι το οποίο είναι λογικό αφού ο διαθέσιμος όγκος αέρα που υπήρχε μειώνεται. Επίσης βλέποντας προσεκτικά τις δύο καμπύλες διαπιστώνουμε ότι για μικρότερη άνοδο της στήλης η πίεση εντός του θαλάμου είναι μικρότερη μιας και ο όγκος του αέρα μειώνεται λιγότερο.

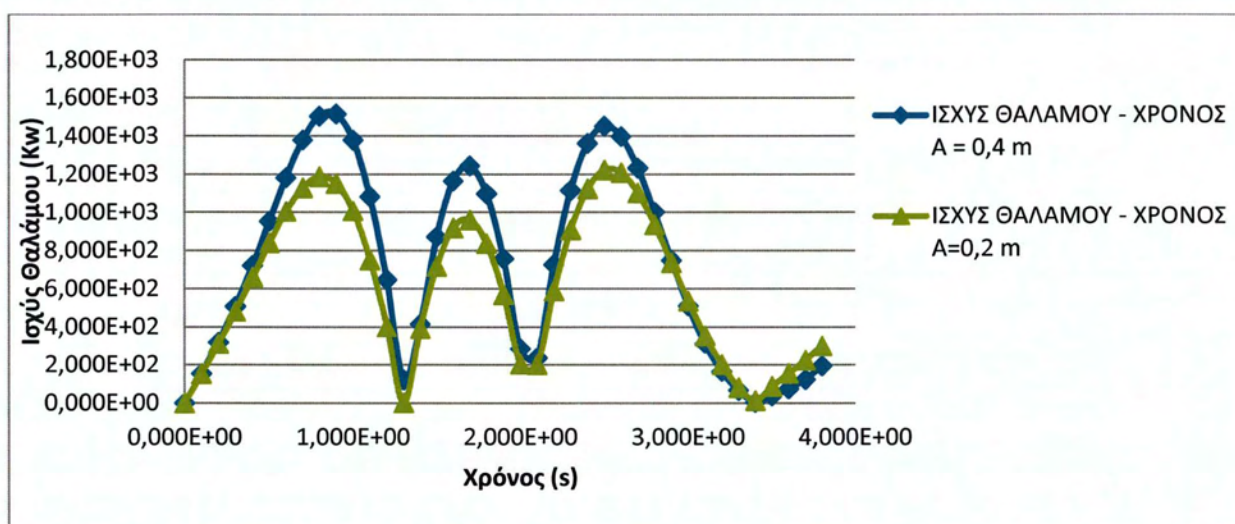


Διάγραμμα 4 : Μεταβολή της παροχής προς τον στρόβιλο συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η χρονική μεταβολή της παροχής αέρα προς τον στρόβιλο. Οι θετικές τιμές της παροχής αντιστοιχούν σε ροή αέρα από το εσωτερικό του θαλάμου προς τον στρόβιλο, ενώ οι αρνητικές σε παροχή αέρα από το περιβάλλον προς τον στρόβιλο.

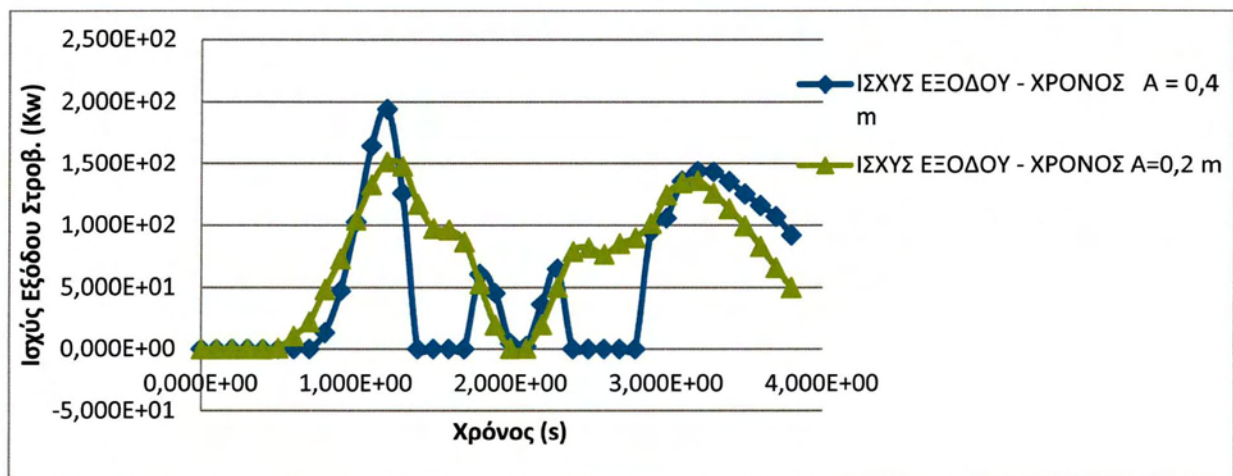
Βλέπουμε ότι για μικρότερο πλάτος κύματος η παροχή αέρα είναι μικρότερη σε ορισμένες χρονικές στιγμές, και αυτό γιατί η παροχή εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό μεταβολής της πίεσης, καθώς και από τον όγκο του αέρα εντός του θαλάμου κάθε χρονική στιγμή.

Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι τη χρονική στιγμή $t = 0$ s όπου η στήλη ύδατος βρίσκεται στη θέση ισορροπίας και ξεκινάμε να μελετάμε το φαινόμενο, η παροχή είναι ίση με το μηδέν $Q_i(0) = 0$ μιας και δεν περνά αέρας από τον στρόβιλο.



Διάγραμμα 5 : Μεταβολή της ισχύος του θαλάμου συναρτήσει του χρόνου

Στο παραπάνω διάγραμμα αναπαριστάται η μεταβολή της αποθηκευμένης ισχύος στον θάλαμο συναρτήσει του χρόνου. Προφανώς για μικρότερα πλάτη κύματος η ισχύς που παράγεται στον θάλαμο θα είναι μικρότερη. Παρατηρώντας προσεκτικά το διάγραμμα, διαπιστώνουμε ότι στις χρονικές στιγμές όπου η πίεση αποκτά τις ακραίες τιμές της η ισχύς στον θάλαμο αποκτά επίσης τις μέγιστες τιμές της.



Διάγραμμα 6 : Μεταβολή της ισχύος εξόδου του στροβίλου συναρτήσει του χρόνου

Στο διάγραμμα 6 φαίνεται η μεταβολή της ισχύος εξόδου του στροβίλου συναρτήσει του χρόνου.

Αυτό το διάγραμμα έχει ορισμένες αξιοσημείωτες ιδιαιτερότητες για τα δύο διαφορετικά πλάτη κύματος. Αρχικά μελετούμε την καμπύλη η οποία αντιστοιχεί σε πλάτος κύματος $A = 0,4$ m. Βλέπουμε ότι τις χρονικές στιγμές για $t = 1 - 1,5$ s και για $t = 2 - 2,5$ s περίπου, η ισχύς εξόδου του στροβίλου μηδενίζεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι γωνία προσβολής / ροής είτε λόγω της πολύ υψηλής κατακόρυφης ταχύτητας προς τον στρόβιλο είναι μεγάλη, είτε λόγω της υπερβολικά χαμηλής ταχύτητας είναι πολύ μικρή. Κάτι τέτοιο έχει ως αποτέλεσμα τη διακοπή της λειτουργίας του στροβίλου, όπως έχει αναλυθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Οι ιδανικές γωνίες ροής " θ " για την αποτελεσματική λειτουργία ενός στροβίλου Wells είναι κατά μέσω όρο $2^\circ < \theta < 14^\circ$. Υπενθυμίζουμε ότι $\Phi = \tan(\theta)$. Επίσης στο μοντέλο το οποίο χρησιμοποιήσαμε για τη μελέτη του φαινομένου δεν έχουμε συμπεριλάβει στους υπολογισμούς τη παροχή αέρα προς τη βαλβίδα ασφαλείας. Αν την είχαμε λάβει υπόψη, ενδεχομένως να μην αντιμετωπίζαμε ένα τέτοιο πρόβλημα.

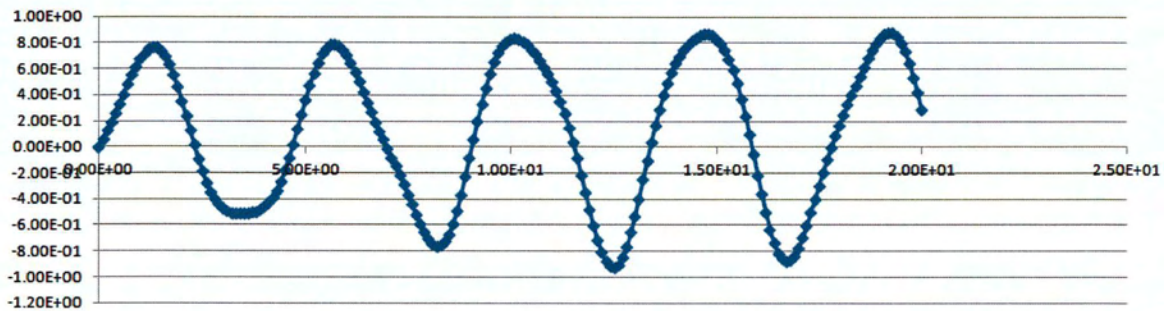
Μελετώντας τώρα τη δεύτερη καμπύλη για πλάτος κύματος $A = 0,2$ m με το οποίο οι ταχύτητες αέρα και η παροχή προς τον στρόβιλο είναι μειωμένες, διαπιστώνουμε μια πιο ομαλή λειτουργία του στροβίλου, αφού οι γωνίες ροής δεν ξεπερνάνε τα επιτρεπτά όρια για τη σωστή λειτουργία.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο στρόβιλος Wells που θα χρησιμοποιήσουμε σε ένα σύστημα παλλόμενης στήλης ύδατος (OWC) θα πρέπει να είναι κατάλληλος για τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της στήλης και των κυματικών συνθηκών της περιοχής στην οποία θα τοποθετηθεί η κατασκευή.

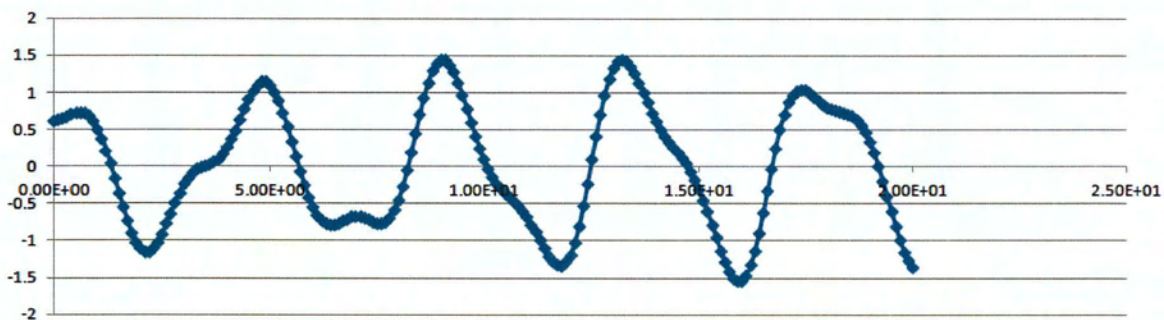
A = 0,4 m

Παρακάτω παρατίθενται διαγράμματα με τη μεταβολή ως προς τον χρόνο διαφόρων μεγεθών, ώστε να μπορέσει να γίνει σύγκριση της μορφολογίας των καμπυλών σε σχέση με αυτές υπαρχόντων συστημάτων παλλόμενης στήλης ύδατος.

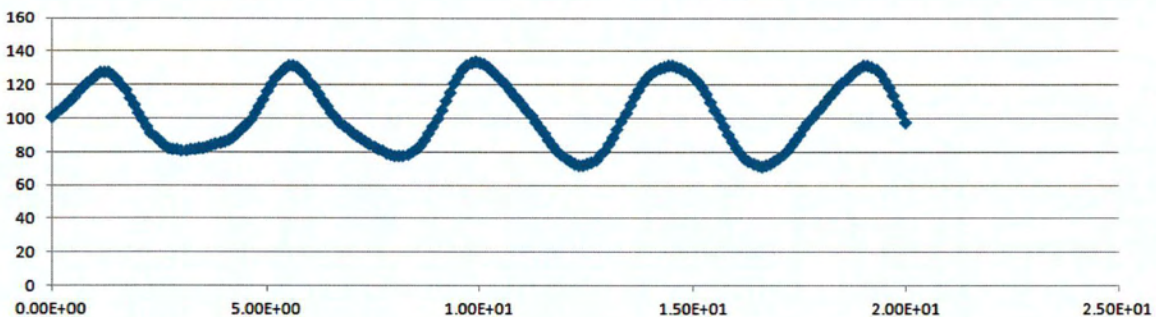
ΣΤΑΘΜΗ - ΧΡΟΝΟΣ



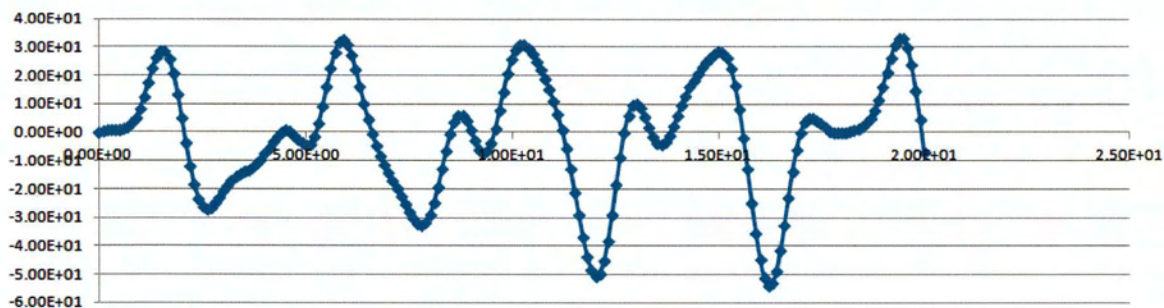
ΤΑΧΥΤΗΤΑ - ΧΡΟΝΟΣ



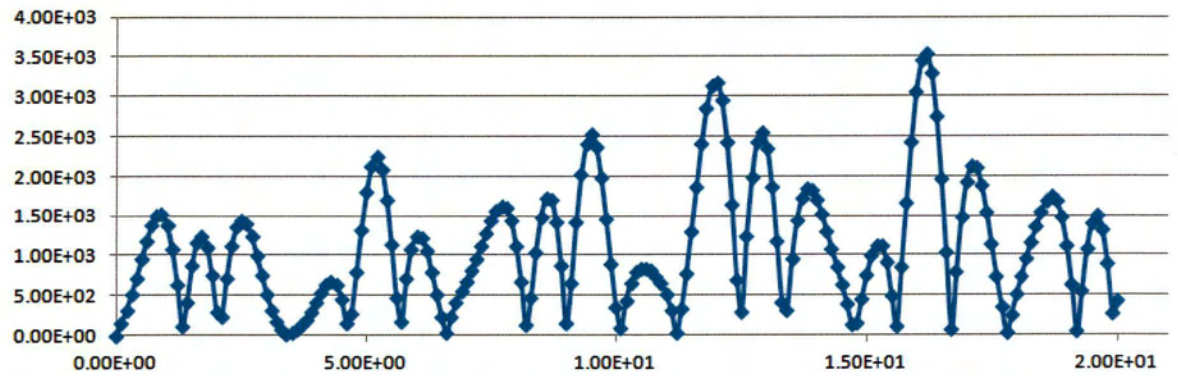
ΠΙΕΣΗ - ΧΡΟΝΟΣ



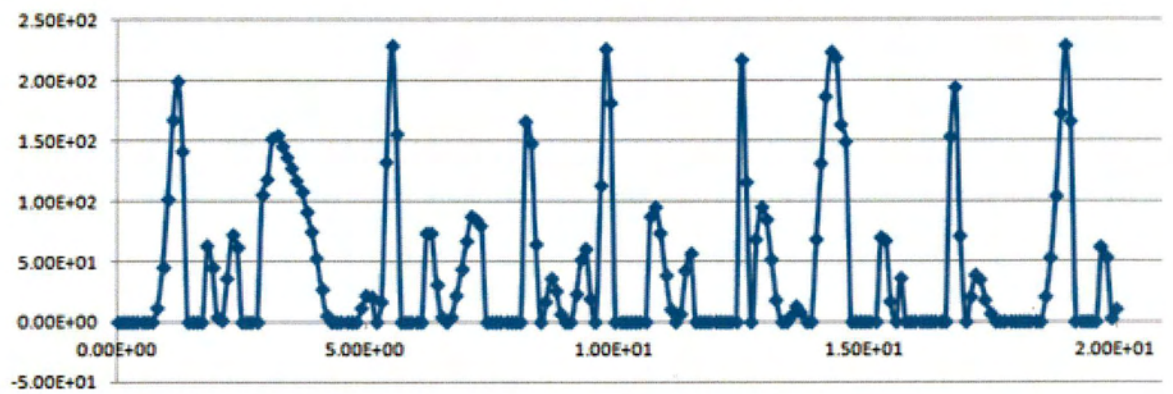
ΠΑΡΟΧΗ - ΧΡΟΝΟΣ



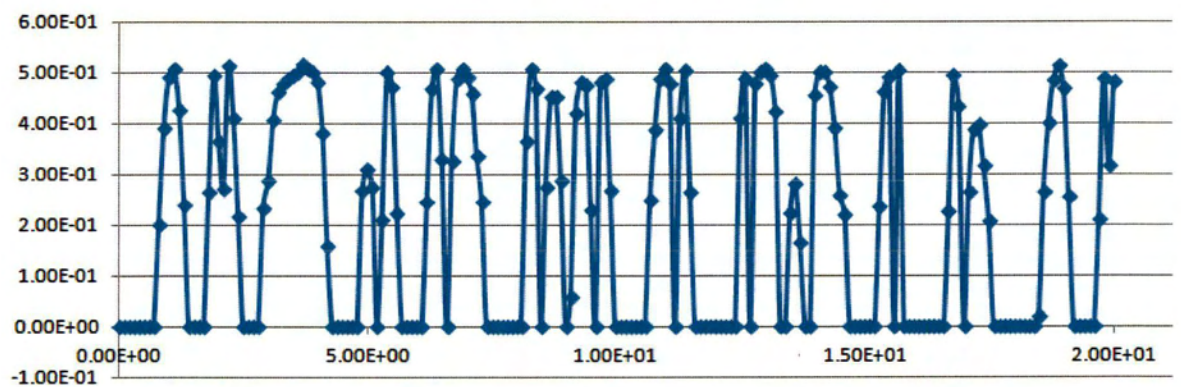
ΙΣΧΥΣ ΘΑΛΑΜΟΥ - ΧΡΟΝΟΣ



ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒ - ΧΡΟΝΟΣ

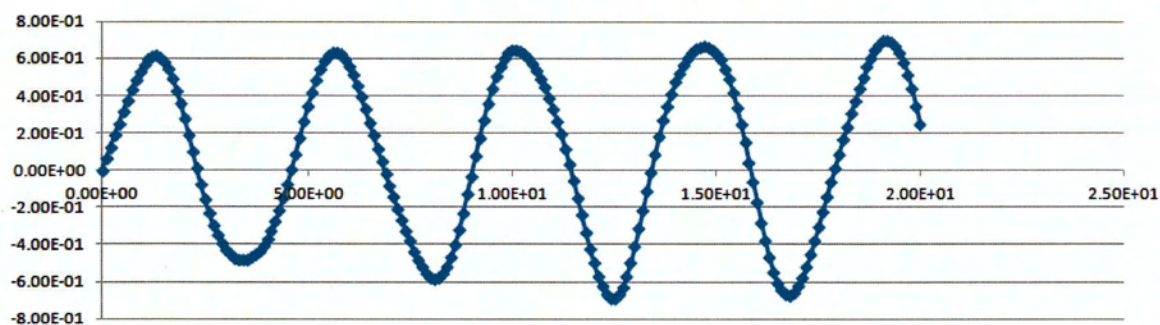


ΑΠΟΔΟΣΗ - ΧΡΟΝΟΣ

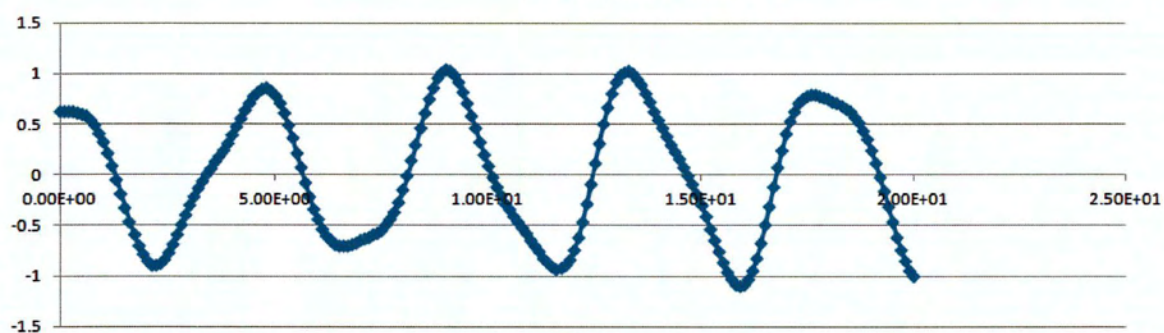


A = 0,2 m

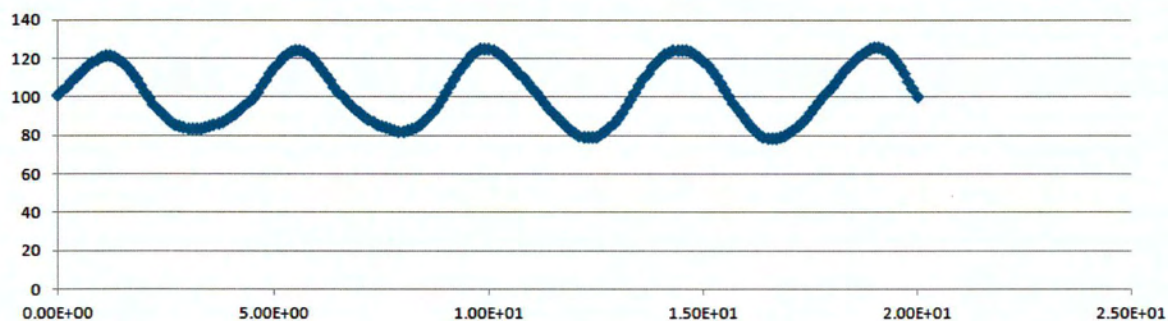
ΣΤΑΘΜΗ - ΧΡΟΝΟΣ



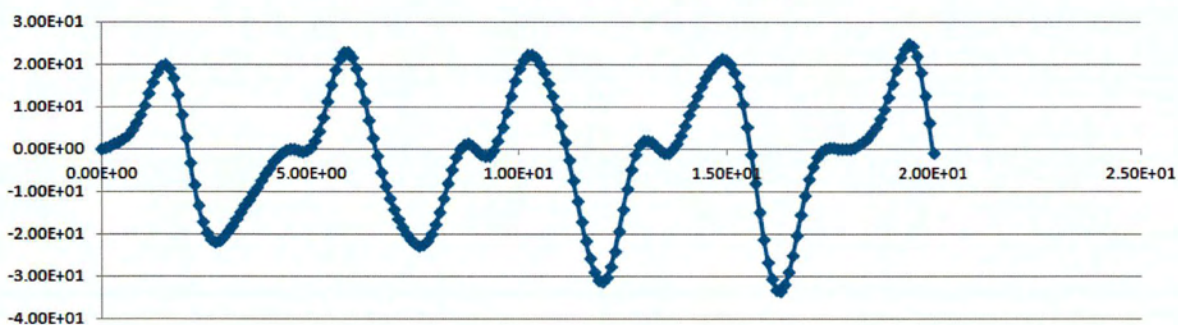
ΤΑΧΥΤΗΤΑ - ΧΡΟΝΟΣ



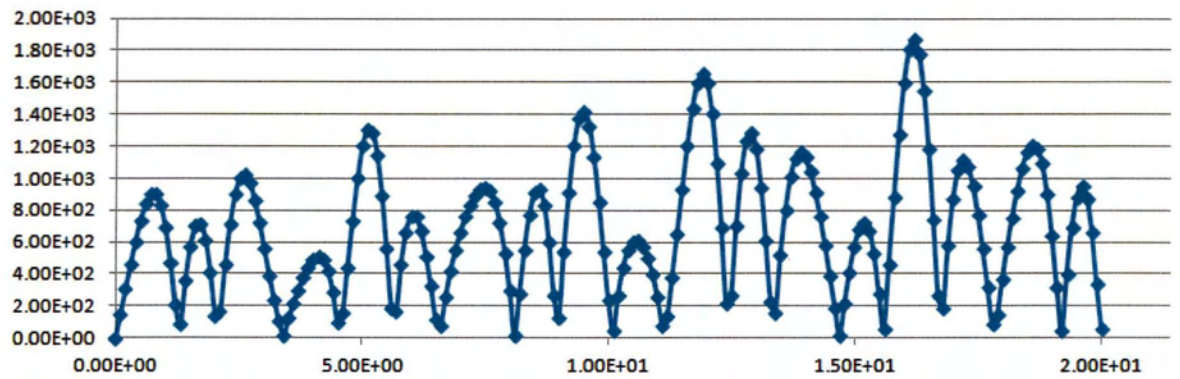
ΠΙΕΣΗ



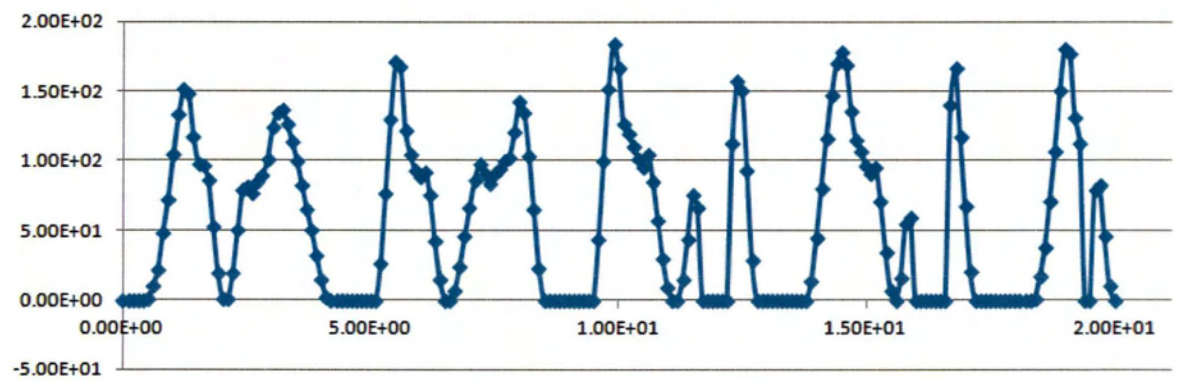
ΠΑΡΟΧΗ - ΧΡΟΝΟΣ



ΙΣΧΥΣ ΘΑΛΑΜΟΥ - ΧΡΟΝΟΣ

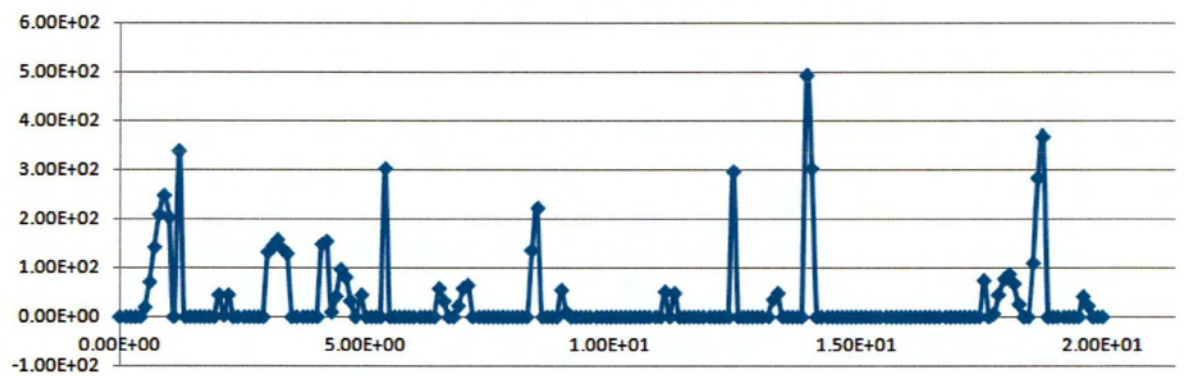


ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒ. - ΧΡΟΝΟΣ

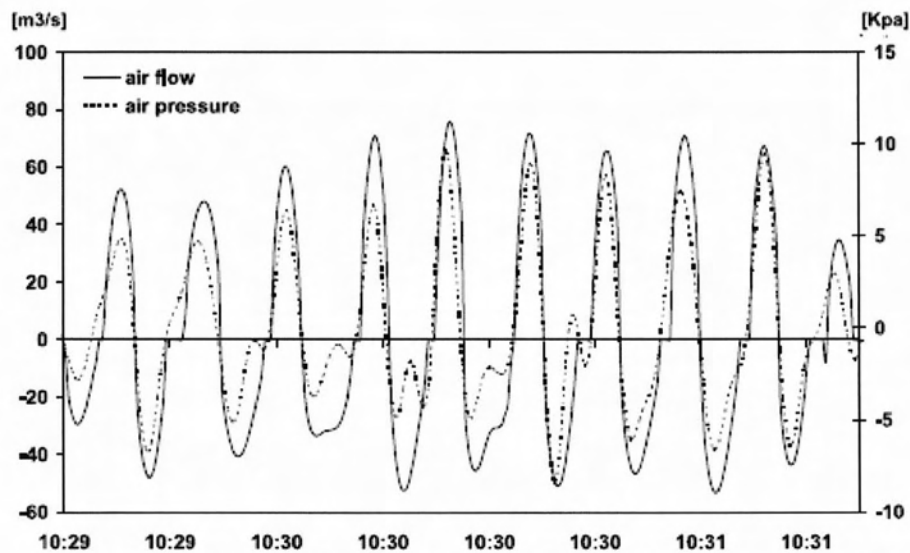


A = 1 m

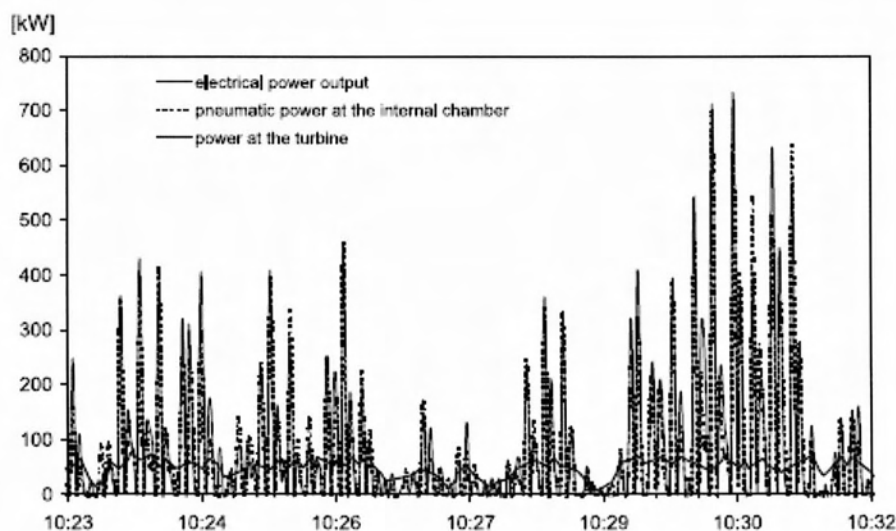
ΙΣΧΥΣ ΣΤΡΟΒ. - ΧΡΟΝΟΣ



Παρατηρώντας το διάγραμμα της ισχύος εξόδου του στρόβιλου για πλάτος κύματος $A = 1\text{m}$, λόγω των πολλών μηδενισμών της ισχύς διαπιστώνουμε ότι ο συγκεκριμένος στρόβιλος Wells δεν είναι κατάλληλος για τέτοιο πλάτος κύματος. Σε περίπτωση εκτόνωσης της πίεσης μέσω κάποιας βαλβίδας εκτόνωσης, η ισχύς του στρόβιλου δε θα μηδενιζόταν, μιας και ένα μέρος της διαθέσιμης ισχύς του θαλάμου θα διέφευγε, ενώ η υπόλοιπη θα μπορούσε να αξιοποιηθεί από τον στρόβιλο. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν αποτελεί σωστό σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος, μιας και όσο μεγαλύτερος είναι ο στρόβιλος τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος το οποίο υπεισέρχεται για τη κατασκευή του.



Διάγραμμα 7 : παροχή στον στρόβιλο και πίεση θαλάμου συναρτήσει του χρόνου για την εγκατάσταση Pico [11]



Διάγραμμα 8 : Ισχύς στρόβιλου, θαλάμου και ηλεκτρική συναρτήσει του χρόνου για την εγκατάσταση Pico [11]

6.6. Υπολογισμός Πλήθους Πτερυγίων

Με το πρόγραμμα στη Fortran είναι επίσης εφικτός ο υπολογισμός του αριθμού των πτερυγίων του στροβίλου σε περίπτωση που δεν τον γνωρίζουμε. Για τον εν λόγω υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές μέθοδοι με τη δική της ακρίβεια η καθεμιά.

♦ Πρώτη Μέθοδος

Τα δεδομένα εισαγωγής είναι :

1. Η ακτίνα του στροβίλου
2. Ο λόγος των ακτινών στροφάλου προς στροβίλου
3. Ο μέσος βαθμός απόδοσης του στροβίλου

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε τους τύπους [50] :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{lc \cdot z}{2\pi t_p} \quad (N1) \\ \sigma &= \sqrt{1 - \bar{n}} \quad (N2) \end{aligned} \right\} \Rightarrow z = \frac{2\pi t_p \sqrt{1 - \bar{n}}}{lc} \quad (N3)$$

Όπου :

- ♦ σ : στερεότητα (solidity)
- ♦ z : αριθμός των πτερυγίων
- ♦ lc : μήκος χορδής πτερυγίου
- ♦ t_p : ακτίνα στροβίλου
- ♦ \bar{n} : ο μέσος βαθμός απόδοσης

Η στερεότητα (solidity) του στροβίλου είναι ένα μέγεθος που εκφράζει τον βαθμό διακοπής της παροχής αέρα διαμέσου του στροβίλου.

Όπως παρατηρούμε από τη σχέση (N2) η στερεότητα (solidity) του στροβίλου εξαρτάται από τον μέσω βαθμό απόδοσης. Ο βαθμός απόδοσης όμως στη περίπτωση των στροβίλων Wells εξαρτάται άμεσα από τη γωνία ροής, η οποία μεταβάλλεται κάθε χρονική στιγμή συναρτήσει της κάθετης ταχύτητας στον στρόβιλο. Κατ επέκταση θα αλλάζει και ο μέσος βαθμός απόδοσης. Συνεπώς αυτή η μέθοδος έχει περιορισμένη ακρίβεια υπολογισμού, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των μετρήσεων του βαθμού απόδοσης.

♦ Δεύτερη Μέθοδος

Τα δεδομένα εισαγωγής είναι :

1. Η μέση παροχή αέρα στον στρόβιλο
2. Η μέση κάθετη ταχύτητα στον στρόβιλο
3. Η διάμετρος του στροβίλου
4. Το μήκος του πτερυγίου
5. Το μήκος της ακτίνας του πτερυγίου

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήσαμε τους εξής τύπους :

$$\left. \begin{aligned} A_t &= \frac{\overline{Q}_t}{\overline{V}_t} \quad (N5) \\ A_t &= \pi t i p^2 - \pi h u b^2 - z l_c b_l \quad (N6) \end{aligned} \right\} \Rightarrow z = \frac{\pi t i p^2 - A_t}{l_c b_l} \quad (N7)$$

Όπου :

- ♦ \overline{Q}_t : Η μέση παροχή στροβίλου
- ♦ \overline{V}_t : Η μέση κάθετη ταχύτητα στον στρόβιλο

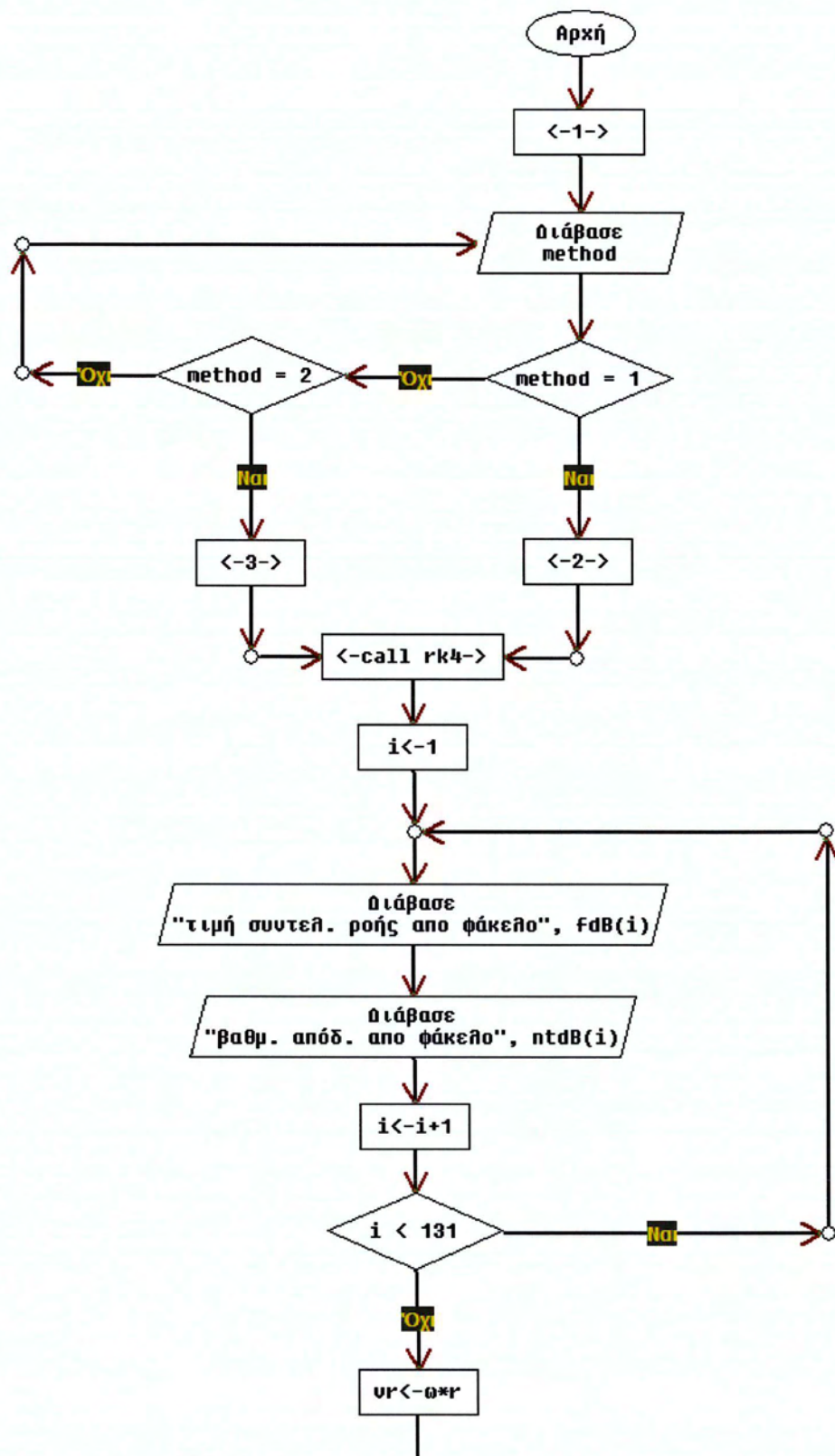
Με αυτή τη μέθοδο θεωρήσαμε ότι τα πτερύγια είναι κάθετα τοποθετημένα στο επίπεδο περιστροφής του στροφάλου (γωνία πτερυγίων $\gamma=0^\circ$) και ότι το εμβαδόν του στροβίλου

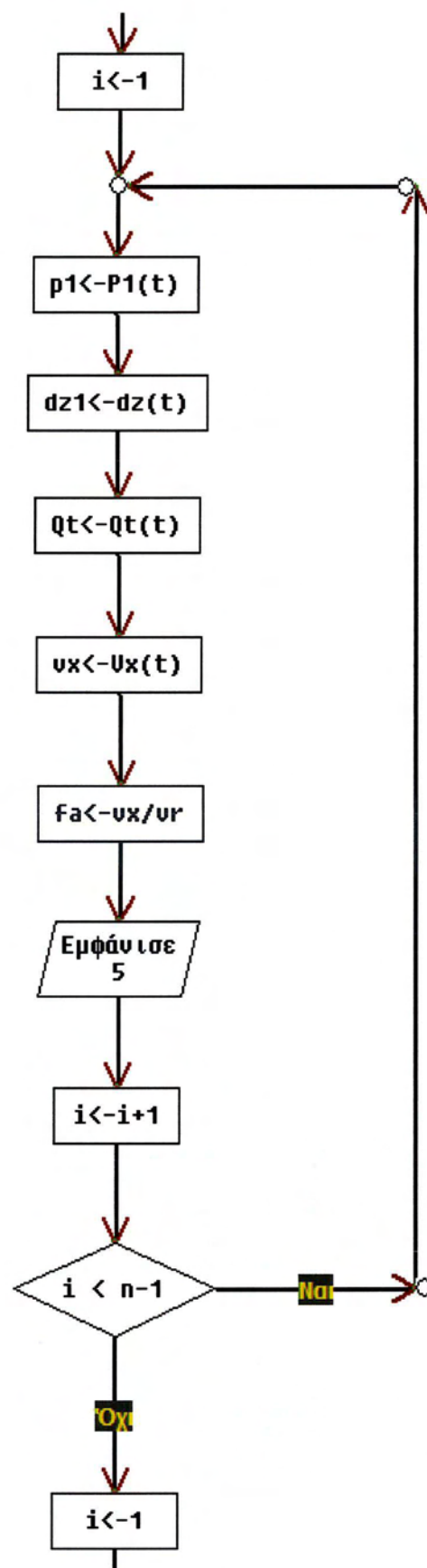
μέσω του οποίου διέρχεται ο αέρας υπολογίζεται αν από το εμβαδόν της διατομής του στροβίλου αφαιρέσουμε το εμβαδόν των πτερυγίων και το εμβαδόν της διατομής του ρότορα.

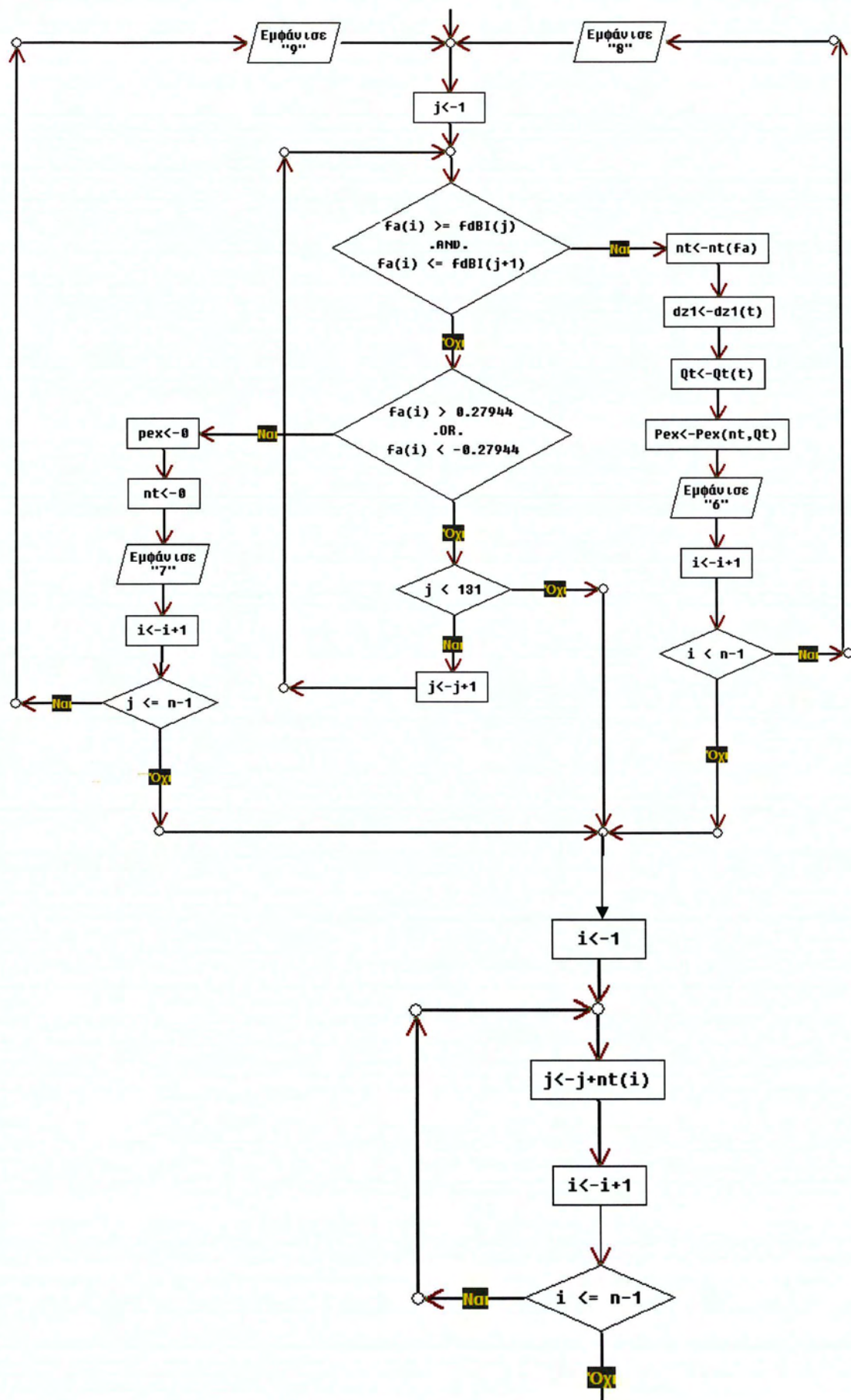
Η δεύτερη μέθοδος προέκυψε ότι έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από την πρώτη μιας και δίνει πάντα σαν αποτέλεσμα τον σωστό αριθμό των πτερυγίων, ενώ το αποτέλεσμα της δεύτερης εξαρτάται από τον αριθμό των επαναλήψεων οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τον μέσω βαθμό απόδοσης.

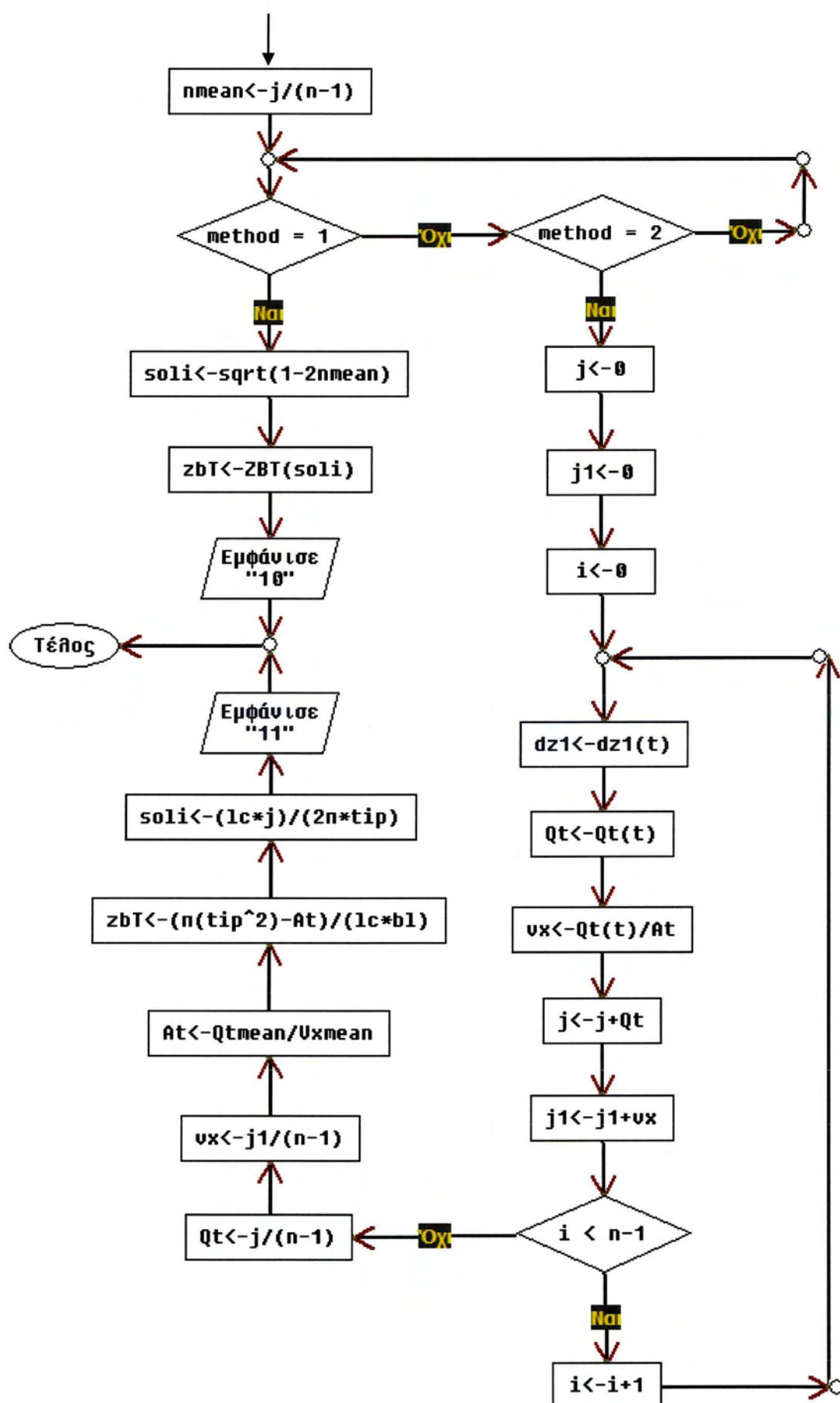
7. Διάγραμμα Ροής

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων :









Η αντιστοιχία των αριθμών, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί στη θέση σημείων εισόδου δεδομένων ή εξόδου αποτελεσμάτων στο διάγραμμα, φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :

<p>(1) $z1(1)=101.325$ αρχική συνθήκη πίεσης $z2(1)=0$ αρχική συνθήκη θέσης $z3(1)=0.628$ αρχική συνθήκη ταχύτητας $h=0.1$ $T=2$ $w=2*3.14/T$ $k1=2*3.14/(w*T)$ $A=108$ $Po=101.325$ $d=4$ $h1=5$ $ro=1.2$ $g2=1.4$ $b=1.5$ $dtur=1.5$ $tip=dtur/2$ $HT=0.62$ $hub=tip*HT$ $bl=tip-hub$ $rR=(tip+hub)/2$ $zb=7$ $wr=101.95$ $lc=0.32$</p>	<p>(4) $write(4,*)z1(i)$ $write(5,*)z2(i)$ $write(6,*)z3(i)$ $write(7,*)x(i)$</p> <p>(5) $write(8,*)P1$</p> <p>(6), (7) $write(17,*)fa(i)$ $write(18,*)pex$</p> <p>(8),(9) $write(13,*)nt(i)$</p> <p>(10) $print*, 'solidity=', soli$ $print*, 'αριθμός πτερυγίων=', ZbT$</p>
<p>(2) $At=(3.14*tip^2)*(1-HT^2)$</p> <p>(3) $At=(3.14*(tip^2))-π*hub^2 zb*lc*bl$</p>	<p>(11) $print*, 'solidity=', soli$ $print*, 'αριθμός πτερυγίων=', zbT$</p>

Επίσης όπου :

- $z_{bT} = z$ (εξισώσεις : N3 ή N7)
- $Q_i(t) = Q_i$ (εξίσωση : K4 / σελ.105)
- $dz1 =$ εξίσωση (Σ1) / σελ. 103
- $P1 =$ εξίσωση (Σ4) / σελ. 103
- $p_{ex} =$ εξίσωση (K5) / σελ.105

Το πρόγραμμα το οποίο κατασκευάστηκε για τη μελέτη της παλλόμενης στήλης ύδατος χρησιμοποιεί τρεις συναρτήσεις και μια υπορουτίνα.

Οι τρεις συναρτήσεις περιέχουν τις εξισώσεις (Σ1), (Σ2) και (Σ3) της σελίδας 103.

Η υπορουτίνα η οποία χρησιμοποιήθηκε εκτελεί τον αλγόριθμο της αριθμητικής μεθόδου Runge – Kutta 4^{ης} τάξης [51]. Οι μεταβλητές εισόδου προέρχονται από τις τρεις συναρτήσεις που προαναφέρθηκαν. Η υπορουτίνα επιλύει το σύστημα των εν λόγω εξισώσεων και το αποτέλεσμα της επίλυσης είναι οι τιμές της πίεσης στον θάλαμο, της στάθμης του νερού στη στήλη και της ταχύτητας ταλάντωσης κάθε χρονική στιγμή.

8. Βιβλιογραφία

- [1] Rodrigues, L <<Wave power conversion systems for electrical energy production>> στο <http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>
- [2] <<Wave - History and Development>> στο <http://www.aquaret.com/en/elearningtool/technologyslection/4-wave-/41-history-and-development->
- [3] <<Κύμα>> στο <http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%8D%CE%BC%CE%B1>
- [4] <<Wave power>> στο http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power
- [5] Rodrigues, L <<Wave power conversion systems for electrical energy production>> στο <http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>
- [6] Λεμονής, Γ. (2002). <<Wave energy Utilization in Europe>>, Πικέρμι : Εκδόσεις EESD.
- [7] <<Ocean Waves>> στο <http://www.energy-without-carbon.org/WaveEnergy>
- [8] Carter, R. (2005) Wave Energy Converters and a Submerged Horizontal Plate. Master Of Science In Ocean and Resources Engineering. Thesis University of Hawaii
- [9] <<How to turn waves into Watts>> στο http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2007/wave_power_plants.htm
- [10] Waveplam, Archipelagos Institute of Marine Conservation (2009) <<Το πώς και το γιατί της επένδυσης στην κυματική ενέργεια – Intelligence Energy Europe>>
- [11] Cruz, J (2008). <<Green Energy and Technology – Ocean Wave Energy>>, Βερολίνο : Εκδόσεις Springer
- [12] Tease, W.K. & Lees, J. & Hall, A. (2007). <<Advances in Oscillating Water Column Air Turbine Development>>, Wavegen
- [13] Shaaban, S. (2012). <<Insight analysis of biplane Wells turbine performance>>, Εκδόσεις : Science Direct – Elsevier
- [14] Παντζόπουλος, Δ. (2012) <<Σχέδιο στο SolidWorks>>
- [15] Rodrigues, L <<Wave power conversion systems for electrical energy production>> στο <http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>
- [16] Rodrigues, L <<Wave power conversion systems for electrical energy production>> στο <http://www.icrepq.com/icrepq-08/380-leao.pdf>
- [17] Whittaker, J.T. & Langston, D. (2002) <<Islay Limpet Wave Power Plant – Publishable Report>>, Αγγλία : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Belfast.
- [18] <<Weca>> στο <http://www.daedalus.gr/prdre3.html>

- [19] Margheritini, L., Kofoed, J.P.n & Frigaard, P.<<Status and performance of the SSG Wave Energy Converter>>. Δανία : Department of Civil Engineering Aalborg University.
- [20] Μυλωνάς, Ε.Μ. & Βούρος,Κ.Ι. <<The theoretical assessment and design of an innovative Wave Energy and Pneumato-Mechanical Conversion System>>. Ελλάδα : Daedalus
- [21] <<WAVEenergy>> στο <http://www.waveenergy.no/History1.htm>
- [22] Centre For Renewable Energy Sources (2003). <<Economical Efficient Floating Device For Wave Power Conversion Into Electricity ; Phase 1: Mathematical & Phystical Model Testing>>
- [23] <<Directory : S.D.E. energy Ltd>> (2006) στο [http://peswiki.com/index.php/Directory:S.D.E. Energy Ltd](http://peswiki.com/index.php/Directory:S.D.E._Energy_Ltd)
- [24] Caddet Japanese National Team, <<The Mighty Whale>> (2008). Στο <http://www.caddet-re.org/assets/199art3.pdf>
- [25] <<The Mighty Whale>> στο <http://energy.saving.nu/hydroenergy/wave.shtml>
- [26] Michaelis, D. & Michaelis, A.<<Lilypad twin membrane>> στο http://www.e-architect.co.uk/energy_island.php
- [27] Ocean Motion International <<CES – OMI>> στο www.oceanmotion.ws
- [28] <<WET EnGen>> στο <http://www.waveenergytech.com/wetEnGen.aspx>
- [29] <<Wave Energy Module – WEM>> στο <http://www.wempower.it/en/wem-wave-energy/>
- [30] Aquamarine Power <<Oyster>> στο <http://www.aquamarinepower.com/technology/>
- [31] McDermott,M. (2009). <<1 Gigawatt of Marine Power to be Developed by Aquamarine Power in UK & Ireland>> στο <http://www.treehugger.com/renewable-energy/1-gigawatt-of-marine-power-to-be-developed-by-aquamarine-power-in-uk-ireland.html>
- [32] Salton, J. (2009) <<Oyster – the world’s largest working hydro – electric wave energy device>> στο <http://www.gizmag.com/oyster-hydro-electric-wave-energy-device/13461/>
- [33] Seawood Designs Inc. <<Surfpower>> στο <http://www.surfpower.ca/index.html>
- [34] Nicoll, R. (2012). <<SurfPower Computer Modeling Phase III>> Dallas : Εκδόσεις DSA – Dynamic Systems Analysis
- [35] <<Oceanlinx – BlueWAVE>> στο <http://www.oceanlinx.com/technology>
- [36] Yoshio, M., Kuboki,T.,Thakker,A.,Lewis,T.Liang, X., Guangzhou, G. (2002). <<Prospect of Economical Wave Power Electric Generator by the Terminator

Backward Bent Duct Buoy – BBDB>> Ιαπωνία : International Society of Offshore and Polar Engineers

- [37] Toyota, K., Nagata, S., Imai, Y. & Setoguchi <<Research for evaluating performance of OWC-type Wave Energy Converter “Backward Bent Duct Buoy”>> . Ιαπωνία : Saga University.
- [38] <<SPERBOY>> στο [http://www.sperboy.com/index.html? ret =return](http://www.sperboy.com/index.html?ret=return)
- [39] <<Wave Dragon>> στο <http://www.wavedragon.net/>
- [40] <<Archimedes Wave Swing – AWS>> στο <http://www.awsocan.com/careers.aspx>
- [41] <<WAVESTAR>> στο <http://wavestarenergy.com/>
- [42] <<Renewable Energy Sources – Wavestar>> στο <http://www.kk-electronic.com/Default.aspx?ID=9464>
- [43] <<AquaBuoy>> στο <http://peswiki.com/index.php/Directory:AquaBuOY>
- [44] <<AquaBuoy >> στο [http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE514 Coastal Engineering/2008 Students web/Angus/Main_page.html](http://homepages.cae.wisc.edu/~chinwu/CEE514_Coastal_Engineering/2008_Students_web/Angus/Main_page.html)
- [45] <<Pelamis Wave power>> στο <http://www.pelamiswave.com/>
- [46] <<Pelamis launch wave power plant in Portugal >> στο <http://greentech.co.uk/pelamis-launch-wave-power-plant-in-portugal-230>
- [47] Morrison, G.I. & Greated, C.A. <<Oscillating Water Column Modelling>>
- [48] Crom, I., Brito-Melo, A., Neumann, F. & Sarmento, A. (2009) <<Numerical Estimation of Incident Wave Parameters Based on the Air Pressure Measurements in Pico OWC Plant>>
- [49] Mohamed H. (2011). <<Design Optimization of Savonius and Wells Turbines>>, University of Magdeburg
- [50] S.L. Dixon, B.Eng (1998). <<Fluid Mechanics Thermodynamics of Turbomachinery>>, Οξφόρδη : Εκδόσεις Plant A Tree
- [51] Βαλουγεώργης Δ., Λυχναρόπουλος Ι. <<Κώδικας Fortran μεθόδου Runge – Kutta 4^{ης} τάξης>> στο www.mie.uth.gr



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000114144